



Aalto-yliopisto
Insinöörیتieteiden
korkeakoulu

Miikka Häjänen

Digitaaliset toimintamallit valutuoteteollisuudessa

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi diplomi-insinöörin tutkintoa varten.

Espoossa 24.04.2017

Valvoja: Professori Juhani Orkas

Ohjaaja: Diplomi-insinööri Kalle Jalava

Tekijä Miikka Hjänen

Työn nimi Digitaaliset toimintamallit valutuoteteollisuudessa

Koulutusohjelma Konetekniikan koulutusohjelma

Pääaine Koneensuunnittelu**Koodi** K3001

Työn valvoja Professori Juhani Orkas

Työn ohjaaja Diplomi-insinööri Kalle Jalava

Päivämäärä 24.04.2017**Sivumäärä** 9 + 97**Kieli** Suomi

Tiivistelmä

Digitaalisten sovellusten kasvun lisääntyminen valmistavan teollisuuden aloilla, kuten valutuoteteollisuudessa, vaatii työkalujen, prosessilaitteiden ja valutuotteiden digitalisointia. Digitalisoidussa valimossa valutuotteet keskustelevat automaattisin toiminnoin tuotannon prosessilaitteiden kanssa, jolloin valutuotteiden valmistuksessa käytetyt prosessiparametrit jäävät yksilöllisiin valutuotteiden tunnisteisiin muistiin. Yksilöllisiä valutuotteen tunnisteita voivat olla esimerkiksi 2D-kuviokoodit tai RFID. Samalla valutuotteista voidaan siirtää prosessikohtaisia prosessiparametreja suoraan valutuotteesta käyttölaitteisiin tuotannon tehostamiseksi ja joustavuuden lisäämiseksi. Valutuotteista kerätyn prosessidatan ja automaattisten dataa analysoivien sovellusten avulla voidaan ennakoida valutuotteissa ilmeneviä ongelmia reaaliaikaisesti ja mahdollisesti estää niiden syntyminen kokonaan. Pidemmältä aikaväliltä kerätyn datan avulla ja dataa analysoivien sovellusten kehittämisellä voidaan tuotantoa kehittää myös jatkuvasti eteenpäin. Yksilöllisten tunnisteiden avulla voidaan myös jälkikäteen paikantaa mahdollisesti vialliset valutuotteet käyttökohteissaan, mikä mahdollistuu valimon ja asiakkaan yhteistyöllä. Sujuva yhteistyö asiakkaan ja valimon välillä onnistuu esimerkiksi avoimen digitaalisen alustan avulla. Tuotekehityskustannusten alentamiseksi ja tuotekehitysvaiheen nopeuttamiseksi voidaan yhä tehokkaammin käyttää myös materiaalia lisääviä teknologioita sekä kehittyneitä simulointi- ja optimointimenetelmiä.

Avainsanat Valuteollisuus, digitalisaatio, älykäs valimo, digitalisointi, valutuote, IoT, M2M, prosessidata, digital twin, seuranta, tunnistus, RFID, 2D-kuviokoodi, DataMatrix, viivakoodi, Magmasoft, optimointi

Author Miikka Häjänen		
Title of thesis Digital procedures in foundry industry		
Degree programme Mechanical Engineering		
Major Machine Design		Code K3001
Thesis supervisor Juhani Orkas, Professor		
Thesis advisor Kalle Jalava, M.Sc.		
Date 24.04.2017	Number of pages 9 + 97	Language Finnish

Abstract

Increasing amount of digital applications in manufacturing industries like metal casting industry, demands digitizing of casting products, actuators and tools. In digital foundry, communication between castings and actuators is executed by automatically driven procedures while castings' process data are gathered in digital memories of individual casting identifiers which may be 2D barcodes or RFID. Process related parameters can also be transferred simultaneously and directly from smart castings' identifiers to actuators in order to enhance productivity and increase flexibility. With gathered process data and automatically driven data analyses, casting defects can be predicted and prevented in real time. Productivity enhances constantly with continuous data analysing application development and with longer data gathering periods. Afterwards it is possible to locate faulty castings in the final destinations of the casting products in collaboration with customer and foundry. Close collaboration, for example, can be implemented with the use of open digital platform. In order to reduce product development costs of a new casting product and speed up the development phase, additive manufacturing technologies together with the advanced casting simulation optimization methods can be used with increasing effectiveness.

Keywords Foundry industry, digitalization, smart foundry, digitizing, casting, IoT, M2M, process data, digital twin, tracking, identification, RFID, 2D barcode, DataMatrix, barcode, Magmasoft, optimization

Alkusanat

Tämä diplomityö on osa FIN3D - Finnish Industry New Age 3D -projektia, jonka tavoitteena on tehostaa valimo- ja konepajateollisuuden toimintoja erilaisten uusien digitaalisten ratkaisujen avulla. Valimoiden nykyisen digitaalisen valmiuden kartoittamisen lisäksi, keskityttiin tässä diplomityössä erityisesti valutuotteiden tunnistus- ja seurantamenetelmien käyttöön sekä tarkemmin yhden tunnisteteknologiaratkaisun käytännön suorituskyvyn testaamiseen valutuotteissa. Työn ohella tutustuttiin myös valuoptymointityökalun käyttöön ja sen tuomiin mahdollisuuksiin.

Haluan kiittää kaikkia projektin osapuolia yhteistyöstä tämän diplomityön aineiston kokoamisessa sekä hyvistä näkökulmista ja kaikesta saamastani avusta valutuotteiden tunnistus- ja seurantamenetelmiin liittyen. Erikseen kiitokset Sacotec Component Oy:lle, Componenta Oyj:lle ja Oras Groupille yritysvierailuista ja haastattelumahdollisuuksista.

Erityiskiitokset tämän diplomityön vastaavalle professorille Juhani Orkakselle monien yllättävien vaiheidenkin jälkeen diplomityön toteuttamisen mahdollistamisesta. Kiitokset haastattelumateriaaleja varten tehtyjen yritysvierailujen järjestämisestä, mielenkiintoisesta- ja ajankohtaisesta diplomityönaiheesta sekä luottamuksesta tästä työstä suoriutumiseen.

Suuret kiitokset diplomityöni ohjaajalle Kalle Jalavalle aina oikeiden yhteyshenkilöiden löytämisessä sekä diplomityöhöni liittyneiden käytännön järjestelyiden neuvonnassa. Haluan kiittää myös työni ohjauksesta yleisesti sekä siitä suuresta määrästä konsultaatioapua, jonka sain valuihin ja valusimulointeihin liittyen.

Espoo 24.04.2017

Miikka Häjänen

Sisällys

1.	Johdanto	1
2.	Teollinen digitalisaatio	2
3.	Valutuoteteollisuus	3
3.1.	Valutuoteteollisuuden kehityssuunnat	6
3.2.	Valimon toiminta	9
3.2.1.	Valimon tuotantoketju	9
3.3.	Valutuoteteollisuus Suomessa	10
3.3.1.	Valutuotannon nykytila	11
3.3.2.	Käytännön toimintamallit	12
3.3.3.	Valujen tunnistaminen	14
3.3.4.	Digitalisaation nykytilanne ja odotukset	15
4.	Valutuotannon digitalisointi	16
4.1.	Valun suunnittelu ja -simulointi valutuotannossa	19
4.1.1.	Valun suunnittelun perusteet	19
4.1.2.	MAGMASOFT -valusimulointi	23
4.1.3.	MAGMASOFT -valuoptimointi	29
4.2.	Valujen seuranta- ja tunnistusmenetelmät	34
4.2.1.	Nykyiset menetelmät	36
4.2.2.	Viivakoodi- ja 2D-kuviokooditekniikat	37
4.2.3.	RFID -tekniikat	45
5.	Älykkään koevalun suunnittelu digitaalisin keinoin	52
5.1.	Koejärjestelyt ja valuprosessin suunnittelu	53
5.1.1.	RFID-insertin suunnittelu ja toteutus	55
5.1.2.	Valutuotteen suunnittelu	59
5.1.3.	Valujärjestelmän suunnittelu ja optimointi	60
5.1.4.	RFID-tunnistimien toiminta metalliympäristössä	68
5.1.5.	1. Koevalu	74
5.1.6.	2. Koevalu	78
5.2.	Koetulosten arviointi ja johtopäätökset	81
5.2.1.	MAGMASOFT -optimoinnin arviointi	81
5.2.2.	Koevalutulosten arviointi	87
5.2.3.	Valutuotteiden tunnistusmenetelmien arviointi	89
6.	Yhteenveto	91
	Lähteet	92
	Liitteet	97

1. Johdanto

Yhä lisääntynyt digitaalisuus valmistavan teollisuuden aloilla, kuin myös valutuoteteollisuudessa, tuo mukanaan uusia tehokkaita työtapoja tuotannon tehostamiseen ja laadun parantamiseen sekä luo mahdollisesti jopa uutta liiketoimintaa. Digitaalisten menetelmien tehokas hyödyntäminen on tosin vielä alkutekijöissä eikä yleisiä toimintamalleja eri teollisuuden aloille ole vielä juurtunut. Lisääntyneestä digitaalisuudesta kehitetään kuitenkin jatkuvasti uusia sovelluskohteita, joten valutuotannon digitalisoinnin mahdollistavien oikeiden työkalujen löytäminen lisääntyvän digitaalisuuden hyödyntämiseksi olisi erityisen tärkeää.

Valutuotannossa pienetkin muutokset valuprosessin valuparametreissa voivat olla hyvin kriittisiä valun onnistumisen kannalta. Esimerkiksi aamulla valettu valuerä voi onnistua valimossa täydellisesti, kun taas illalla valetuista valutuotteista kaikki joudutaan hylkäämään. Syy voi johtua esimerkiksi vaihtelusta valumateriaalin seostuksessa tai ympäristön lämpötilan ja kosteuden muutoksista, mutta varsinainen syy jää usein epäselväksi, koska ei voida varmasti todentaa mikä valuun vaikuttanut prosessiparametri on muuttunut. Valutuotteiden yksilöllistä prosessidataa analysoimalla tilanne voisi kuitenkin mahdollisesti muuttua. Kattavan prosessidatan kerääminen vaatisi kuitenkin kehittyneempiä valutuotteiden tunnistusmenetelmiä, joilla valukohtaista prosessidataa voitaisiin kerätä automaattisin toiminnoin ilman, että valutuotannon tehokkuus siitä kärsisi. Valimoympäristöissä vallitsevien rankkojen olosuhteiden vuoksi useimmat tällaiset tunnistusmenetelmät ovat kuitenkin usein käyttökelvottomia sellaisenaan toteutettavaksi valutuotteissa.

Valusimulointi ennen tuotekehitysvaiheessa olevan valutuotteen koetuotantoa on vakiintunut menetelmä valutuotannon tehostamiseksi ja kustannusten alentamiseksi. Lyhyet toimitusaikavaatimukset kuitenkin pakottavat usein vielä tuotekehitysvaiheessa olevien valutuotteiden testaamisen perinteisin keinoin useilla koevaluilla, jolloin pienin prosessiparametreihin tehdyin muutoksin tai valumuotteihin tehdyin korjauksin etsitään ratkaisua valun onnistumiseksi. Kehittyneimpien valusimulointiohjelmien optimointityökaluilla useiden koevalujen sarjat voisivat ehkä jäädä vähemmälle, jos automaattisen optimointityökalun avulla voitaisiin tehdä samat prosessiparametrien tai valutuotteen geometriamuutokset, jotka tehtäisiin muutenkin koevaluissa testaamalla – sillä erolla, että koevalujen kustannuksia ei näin syntyisi.

Tämän diplomityön tarkoituksena on esitellä valutuoteteollisuuden jo käytössä olevia digitaalisia menetelmiä sekä kartoittaa olemassa olevia tai kehitteillä olevia mahdollisesti tehokkaampia digitalisoitumisen ratkaisuja ja arvioida niiden toimivuutta valutuotannossa. Työssä keskitytään erityisesti valutuotteiden yksilöllisten tunnistus- ja seurantamenetelmien yleiseen toimivuuteen ja käytännön toteutusmahdollisuuksiin sekä annetaan suuntaa yksilöllisempien tunnistusmenetelmien tuomista mahdollisuuksista. Kokeellisten testien perusteella arvioidaan myös yhden nykyaikaisen yksilöllisen tunnistusmenetelmän soveltuvuutta valimoympäristöihin. Tunnistus- ja seurantamenetelmien ohessa tutustutaan myös *MAGMA*⁵-valusimulointiohjelman optimointityökalun tuomiin mahdollisuuksiin valutuotteiden laadun parantamisessa ja testataan optimointityökalun suorituskykyä käytännön esimerkillä.

2. Teollinen digitalisaatio

Paljon puhuttu digitalisaatio on kovaa vauhtia aloittamassa digimurroksen myös valmistavan teollisuuden aloilla. Automaation jälkeen seuraavan suuren teollisuuden vallankumouksen uskotaan löytyvän juuri ”teollisesta internetistä” tai ”esineiden internetistä”(engl. *IoT = Internet of Things*), joka yksinkertaistettuna tarkoittaa sitä, että tuotteissa ja tuotantolaitteissa on älyä ja ne ovat vuorovaikutuksessa keskenään. Tarkemmin määriteltynä tuotantoa ja tehokkuutta parannetaan älykkään sensoriteknologian, koneiden välisen viestinnän (engl. *M2M = Machine to Machine*), kehittyneen automaation ja ohjelmistokehityksen avulla, mikä mahdollistaa muun muassa reaaliaikaisen tiedonsiirron ja sitä kautta tehokkaampia prosesseja. Älykkyyden lisäämisellä on mahdollista päästä eroon monista yksinkertaisista, aikaa vievistä ja suorittavista työmuodoista. Lisäksi älykkäiden tuotantoratkaisujen ympärille voidaan kehittää kokonaan uutta liiketoimintaa. Digitalisaatio ei siis tarkoita työpaikkojen vähentymistä vaan päinvastoin, uusia ovia avautuu uusien toimintatapojen myötä aivan erilaisia taitoja vaativiin työtehtäviin. Kansainväliset arviot digitalisaation tuomista hyödyistä niin tuotannon kasvattajana kuin kilpailukykytekijänä liikkuvat tuhansissa miljardeissa dollareissa.(1-3) Koska teollisen internetin käyttäjiä valmistavan teollisuuden puolella on vielä toistaiseksi vähän, on Suomalaisilla teollisuuden aloilla nyt loistava tilaisuus toimia digitalisaation edelläkävijöinä ja tarttua tilaisuuteen kehittää teollisen internetin työvälineitä ja alustoja. Tällöin voidaan saavuttaa merkittävä kilpailuetu esimerkiksi kansainvälisillä markkinoilla, kun ei tarvitse taipua jo määriteltyihin ja olemassa oleviin ratkaisuihin.(2, 4)

Digitaalisten alustojen käyttö on Suomessa toistaiseksi hyvin vähäistä. Teollisuusyritysten tuotteita voidaan jo seurata ja dataan perustuvia ylläpito- ja huoltotoimenpiteitä voidaan tarjota, mutta käytössä ei tällöinkään ole avoimempi digitaalinen alusta vaan yritysten palomuurin sisäiseen verkkoon perustuva toiminto, josta tietoa haetaan ja siirretään erikseen. Digitaalinen alusta on avoimempi monessa mielessä: siihen voi helposti liittyä ja erota tarpeen mukaan, alustan sisältämä tieto voi olla merkittävästi runsaampaa ja laadukkaampaa, tietoa voi olla ulkopuolisten saatavilla ja kehittäjäkäyttäjille voidaan tarjota erikseen avointa dataa. Esimerkiksi suomalainen hitsausalan yritys Kemppi onkin ottanut askeleen eteenpäin digitaalisen alustan kehittämiseksi ja ilmoitti avaavansa dataa ja ohjelmointirajapinnan sovelluskehittäjille, jotka näin voivat luoda sovelluksia teollisuusjärjestelmiin. Kempin tavoitteena on luoda ekosysteemi digialustansa päälle, jossa se toimii hitsauslaitekäyttäjien ja ohjelmistokehittäjien välittäjänä.(4)

”Data on uusi öljy”

-Anonyymi

Digitaalisuuden hyödyntämisessä Suomessa on erinomaiset lähtökohdat ainakin, mitä on nyt kolmena vuotena perättäin julkaistuun Digibarometriin uskomisen. Digibarometri mittaa 22 eri maan digitaalisia ulottuvuuksia kolmella eri tasolla: edellytykset, käyttö ja vaikutukset. Digitaalisuutta tarkastellaan vielä kolmesta eri näkökulmasta: yritykset, julkinen sektori ja kansalaiset. Vuoden 2016 Digibarometrin mukaan Suomi on nyt noussut sijalle yksi kaikkien tasojen kokonaisindeksissä ja Suomella olisi maailman parhaat edellytykset

hyötyä yhä syvenevästä digitalisoitumisesta. Barometrissa kuitenkin muistutetaan, että sijoituksesta huolimatta ”-- digitaalisuus on edelleen Suomessa suuri, ja pitkälti hyödyntämätön, mahdollisuus”, ja haasteena olisi edelleen digitaalisuuden soveltaminen siten, että siitä syntyisi uudenlaista liiketoimintaa ja tuottoa. Barometrin yritysten näkökulmaa yksityiskohtaisemmin tarkastelevan osion analyysin mukaan digitaalisesti kyvykkäimpien yritysten liikevaihto kasvoi keskimäärin 2,5 % vuosivauhtia, mikä oli selvästi enemmän kuin vertailun alempia digitaalisuuspisteitä saaneet yritykset. Muita yritysosion havaintoja oli, että digitaalisuuden hyödyntämisessä on suuria toimialakohtaisia eroja, ja että kaupan aloilla digitaalisuutta hyödynnetään eniten. Digitaalisesti kyvykkäimmät yritykset olivat usein iältään nuorempia ja sijaitsivat yleensä suuremmissa kaupungeissa muutamia poikkeuksia lukuun ottamatta. Erikoisesti myös yritykset, joiden toimitusjohtajana oli nainen, menestyivät digitaalisuusvertailussa paremmin kuin miesjohtoiset yritykset. Suurempia johtopäätöksiä tekemättä täytyy kuitenkin muistaa, että barometrin analyysi kattaa vain osan yritysten digitaalisuuden tasosta eikä vertailupohja ulotu yritysten sisäisiin järjestelmiin tai prosesseihin. Barometrin yritysten digitaalisuusindeksit on pisteytetty lähinnä verkkosivustojen responsiivisuuden, sosiaalisen median käytön, edistysellisten analytiikka- ja mainontatyökalujen käytön, verkko-ostamisen mahdollisuuden, reaaliaikaisen digitaalisen asiakaspalvelun ja sisältömarkkinoinnin hyödyntämisen mukaan.(4)

Saksa on jo edellä digitalisaation vauhdittamisessa teollisuusyrityksissä INDUSTRIE 4.0 -ohjelmallaan, joka on yksi Saksan valtion High-Tech Strategy 2020 Action Plan -projektin osa-alueista, jotka säädettiin jo maaliskuussa 2012. INDUSTRIE 4.0 tähtää vakiinnuttamaan Saksan aseman johtavana älykkäiden teollisuusratkaisujen tarjoajana ja markkinamaana kehittämällä ja toteuttamalla älykkäitä tuotantoratkaisuja yrityksissä. INDUSTRIE 4.0 -ohjelmalle on varattu Saksan valtion rahoitusta 200 miljoonaan euroon asti High-Tech Strategy 2020 Action Plan -projektin sisällä. Nimi INDUSTRIE 4.0 viittaa juuri seuraavaan koko teollisuuden mullistavaan kehitysaskeleeseen, jossa fyysinen teknologia ja virtuaalimaailma sulautetaan yhteen.(5)

Pitkälle digitalisoidussa yrityksessä kaikki yrityksen talouteen vaikuttavat segmentit toimivat vuorovaikutuksessa keskenään. Tuotannolliset ja liiketaloudelliset päätökset tehdään kerättyyn dataan perustuen niin analyysein kuin vaihtoehtoja laskemalla reaaliaikaisesti.(6) Data on uusi öljy, sanotaan.

3. Valutuoteteollisuus

Valutuotanto on yksi tärkeimmistä tekijöistä teollisuuden eri osa-alueilla. Suurimmat valimoiden asiakkaat löytyvät auto-, kone-, energia-, meri- ja lentokoneteollisuudesta, joista autoteollisuutta voidaan pitää yhtenä suurimpana yksittäisenä valuteollisuuden kehitystä ajavana voimana. Valuja tarvitaan siis lähes kaikenlaisissa teknisissä ratkaisuissa, joista haastavimpina ovat esimerkiksi autoteollisuudessa ja energiatuotannossa tarvittavat moottorilohkot ja sylinterikannet, jotka monimutkaisuutensa ja vaadittujen ominaisuuksiensa vuoksi voidaan tehokkaasti valmistaa vain valamalla. Valaminen valmistusmenetel-

mänä on yksi vanhimmista ja valutekniikat ovat kehittyneet vuosisatojen saatossa tehokkaammiksi samalla valukappaleiden laadun ja suorituskyvyn merkittävästi parantuen. Valamisen perusperiaate on kuitenkin edelleen sama: Sulaa metallia ohjataan onttoon, tavallisesti kahdesta osasta koostuvaan, muottiin, jonka myötäisesti sula asettuu ja lopulta jäähtyy. Jäähtyessään ja muotista irrotettaessa valukappale on enää tarvittavia viimeistelyjä vaille oleva, valmis ja toimiva kappale. Monimutkaisimpien valukappaleiden valmistuksessa voidaan käyttää useampia muottirakenteita ja muotin sisäisiä rakenteita, keernoja, joilla valukappaleen sisäiset onkalomuodot voidaan muodostaa. Käytännössä kaikenlaisia rakenteita voidaan valmistaa valamalla, mutta valamisen erinomaisuus valmistusmenetelmänä tulee erityisesti esille silloin, kun valmistettavassa kappaleessa on haastavia geometrioita ja monimutkaisia kaviteetteja, jolloin valmistaminen muilla menetelmillä ei olisi edes mahdollista tai ainakin se olisi hyvin aikaa vievää.(7)

Valutuotantoa maailmalla mitataan tavallisesti tonnimäärissä rautametallisten ja ei-rautametallisten valujen välillä, mikä on karkea jako yleisimpien valumateriaalien, raudan ja teräksen, erottamiseksi muista pienemmän volyymin materiaaleista. Tosin ei-rautametallista alumiinia mitataan yleensä vielä erikseen, koska koko ajan lisääntyneen kevyempien konstruktiomateriaalien kysynnän vuoksi on alumiini haastamassa teräksen ja raudan volyymiltaan arvokkaimpaa valumateriaalina maailmassa(8). Lisäksi tiheyksiltään huomattavasti erilaisten ei-rautametallisten materiaalien mittaustulokset tonnimäärissä eivät korreloi juurikaan rautametallisten valumateriaalien kanssa ja suositeltavaa olisikin mitata ei-rautametallisia materiaaleja myös muilla keinoin(9). Ylivoimaisesti suurin osa valuista tuotetaan kiinassa niin rautametallisten kuin ei-rautametallisten valujenkin osalta. Vuonna 2014 Kiinan kokonaisvalutuotanto oli 46,2 miljoonaa tonnia, kun toiseksi suurimman valutuotantajamaan, USA:n valutuotanto oli 12 miljoonaa tonnia. Järjestyksessä seuraavina olivat Intia 10 milj. tonnia, Japani 5,6 milj. tonnia, Saksa 5,2 milj. tonnia ja Venäjä 4,2 milj. tonnia.(10) Suomi jää valutuotannollaan kauas kärjestä noin 70 000 tonnin tuotantomäärällään vuonna 2014(11). Euroopan tasolla rautametallivalujen tuotantomäärät ovat pysyneet tasaisesti pienessä laskusuunnassa vuodesta 2011 lähtien(taulukko 1), mutta tulevaisuudessa on kuitenkin odotettavissa maltillista reilun miljoonan tonnin tuotantomäärän kasvua vuoteen 2020 mennessä. Ei-rautametallivalujen osalta on puolestaan havaittavissa selvää tuotantomäärien kasvua Euroopassa vuodesta 2013 lähtien(taulukko 2) ja erityisesti kevytmetallien ajaman kehityssuunnan vuoksi noususuhdanteen odotetaan jatkuvan pitkään.(12) Kevytmetallivalujen kasvua ajaa erityisesti autoteollisuuden tavoitteet lisätä ajoneuvojen energiatehokkuutta vähentämällä ajoneuvojen kokonaispainoa korvaamalla perinteisiä rautaseoksista valettuja moottorilohkoja ja niiden komponentteja kevyemmällä alumiiniseoksilla. Lisäksi perinteisesti teräksestä tehtyjä korroosionkestäviä konstruktiomateriaaleja pyritään korvaamaan yhä enenevissä määrin kevytmetalleilla.(10, 13)

Taulukko 1. Rautametallivalujen kokonaistuotantomäärät [1000 t] Euroopassa(11).

Country	2011	2012	2013	2014	2015	2014 : 2013	2015 : 2014
						+/- %	
Austria	160,8	150,0	152,7	155,4	155,9	1,7	0,3
Belgium	78,3	74,4	71,4	76,5	71,6	7,1	-6,4
Croatia	40,8	41,3	42,8	43,5		1,7	
Czech Rep.	365,7	336,7	328,0	293,5 a)	289,0 a)	-10,5	-1,5
Denmark	79,2		76,2	78,9	77,9	3,6	-1,2
Finland	91,5	78,6	70,1	63,3	59,0	-9,8	-6,7
France	1.674,7	1.436,4	1.419,2	1.393,6	1.328,5	-1,8	-4,7
Germany d)	4.540,2	4.267,4	4.122,7	4.150,9	4.085,4	0,7	-1,6
Hungary	56,8	52,6	69,0	86,6	92,1	25,5	6,3
Italy	1.235,0 b)	1.115,4 b)	1.146,3 b)	1.164,0 b)	1.130,7	1,5	-2,9
Lithuania							
The Netherlands							
Norway	58,2	52,8	53,3	40,1	33,7	-24,8	-15,9
Poland	678,7 a)	688,0	700,0	700,0 a)	709,0 a)	0,0	1,3
Portugal	127,6	116,9	108,3	121,5	137,9	12,2	13,5
Slovenia	145,2	159,0	143,8	153,1		6,5	
Spain	1.106,3	985,5	976,3	1.006,2	1.065,6	3,1	5,9
Sweden	251,1	228,4	228,3	231,6	261,2	1,4	12,8
Switzerland	62,8	47,8	47,3	45,1	38,1	-4,5	-15,4
Turkey	1.262,5	1.260,0	1.243,0	1.400,0	1.470,0	12,6	5,0
United Kingdom	441,8	396,3	363,1	371,2	387,3	2,2	4,3
Total CAEF	12.457,1	11.487,4	11.361,7	11.574,9	11.393,0	1,9	-1,6
Romania	62,9	60,1	44,7				
Russia	3.827,0		3.500,0				
Slovakia	25,0						
Ukraine		1.130,0	985,0				

a) estimated

b) without investment castings: 2011 1222 t

d) revised data

c) production of member foundries

Taulukko 2. Ei-rautametallivalujen kokonaistuotantomäärät [1000 t] Euroopassa(11).

Country	2011	2012	2013	2014	2015	2014 : 2013	2015 : 2014
						+/- %	
Austria	149,1	142,4	131,6	138,0	140,7	4,9	2,0
Belgium	1,2	0,8	1,7	1,9	2,2	9,1	18,4
Croatia	13,0	13,0	20,0	22,3		11,5	
Czech Rep.	94,3	92,0	95,0 a)	108,0 a)	116,0 a)	13,7	7,4
Denmark	4,7		4,1	4,0	4,3	-3,4	9,9
Finland	7,8	6,9	7,6	7,1	8,0	-6,8	12,9
France	371,8	362,3	328,9	335,8	356,9	2,1	6,3
Germany	991,2 c)	988,2 c)	1.007,1 c)	1.134,2 c)	1.221,3	12,6	7,7
Hungary	105,2	102,6	104,6	108,2	112,4	3,4	3,9
Italy	978,3	844,3	825,4	860,9	900,5	4,3	4,6
Lithuania							
The Netherlands							
Norway	7,0	5,6 b)	6,5 b)	6,6 b)	7,2 b)	1,4	10,0
Poland	279,2	348,0	358,0	358,0 a)	353,0 a)	0,0	-1,4
Portugal	24,4	29,2	30,6	34,9	45,4	14,2	30,1
Slovenia	34,9	33,4	38,8	44,9		15,8	
Spain	132,4	133,4	131,3	135,6	146,0	3,3	7,6
Sweden	57,2	55,0	56,9	58,2	62,6	2,3	7,6
Switzerland	24,4	21,6	19,1	20,4	18,1	7,0	-11,4
Turkey	170,5	185,0	300,0	300,0	380,0	0,0	26,7
United Kingdom	135,1	124,0	123,1	131,0	131,0	6,4	0,0
Total CAEF	3.581,7	3.487,4	3.590,2	3.809,9	4.005,6	6,1	5,1
Romania	51,8	57,8	58,3				
Russia	473,0		600,0				
Slovakia	46,0						
Ukraine		402,0	380,0				

a) estimated

b) without copper (only 2 foundries = no data collection)

c) revised figures

3.1. Valutuoteteollisuuden kehityssuunnat

Yhä kiristynyt ympäristöystävällisyys ja tehokkuuteen painottuva kehityssuunnan kasvu luo valimoille merkittäviä haasteita rakentaa sekä taloudellisesti että ekologisesti kestäviä liiketoimintamalleja. Erilaiset valutekniikat ja valimokohtaiset uniikit tuotantoratkaisut rajoittavat tehokkuutta lisäävien teknologioiden hyödyntämistä, kun sarja-, kappalekoko- ja materiaalierot ovat hyvinkin paljon toisistaan poikkeavia. Lisäksi valimoympäristö äärimmäisen suurine lämpötilavaihteluineen toimii merkittävänä haasteena uusien teknologioiden soveltamisessa valimoissa.(14) Valimoiden tulisi pystyä alentamaan tuotannon kustannuksia ja pitämään ne alhaisina samalla, kun pitäisi tuottaa laadukkaita valutuotteita nopeammalla läpimenoajoilla ja lyhemmillä tuotekehitysajoilla. Raaka-aineiden käytön suhteen valimot toimivat yleisesti jo suhteellisen tehokkaasti niin valu-, muotti- kuin keernarakenteidenkin sisäisen kierrätyksen osalta, mutta tulevaisuuden odotukset ympäristöystävällisyydessä ja energiankäytössä vaativat silti valutuoteteollisuuden siirtymistä seuraavalle tasolle ympäristöä säästävissä toiminnoissa, jotta pystyisivät vastaamaan näihin odotuksiin.(7, 14)

Valutuotteiden yksi suurimmista trendeistä on materiaalien korvaaminen kevyemmällä metalliseoksilla, mikä on pitkälti yksinomaan auto- ja lentokoneteollisuuden polttoaineenkulutuksen vähentämiseen tähtäävä kehityssuunta. Kevytmetalleista valmistettujen moottorilohkojen ja komponenttien lisäksi myös ajoneuvojen korirakenteita pyritään korvaamaan yksittäisillä kevytmetallivaluilla. Esimerkkinä henkilöautojen ovien rungot, jotka perinteisesti valmistetaan hitsaamalla yhteen ohuita teräslevyrakenteita, korvataan nyt yhdellä kevytmetallivalulla, jolloin konstruktion massaa saadaan vähennettyä reilusti jopa yli 10 kiloa.(10) Korvaavien kevytmetallikonstruktioiden suunnittelussa on erityisen tärkeää käyttää edistyneitä digitaalisia simulaatiomalleja, joilla hallita ja optimoida ohuiden rakenteiden täydellinen täyttyminen, valuvirheet ja lämpökäsittelyt suunnitellun suorituskyvyn takaamiseksi(15). Vähän vastaavaa trendiä on näkyvissä myös muilla teollisuuden osa-alueilla, joissa perinteisiä yhteenhitsattuja kotelorakenteita korvataan yhdellä valulla. Kotelorakenteiden yhtenäistäminen yhteen valuun mahdollistaa kompaktien ja ominaisuuksiltaan erilaisten kotelorakenteiden muodostamisen eikä tämä kehityssuunta ole rajoittunut vain kevytmetalleihin.(16) Lisäksi rakenneosien yhdistäminen yhteen valuun pudottaa myös kokoonpanoon tarvittavia työvaiheita.

Teknologiakehityksen tuomia keinoja, joilla valimoiden tehokkuutta ja joustavuutta pyritään lisäämään, ovat uudet materiaalia lisäävät menetelmät niin osana muottien valmistusta kuin suoraan valutuotteen valmistuksessa. Materiaalia lisäävät menetelmät mahdollistavat nopeamman tuotekehitys- ja protovaiheen valutuotteille(7). Niin hiekka- kuin tarkkuusvalimoiden tarpeisiin voidaan valumalleja tulostaa jo suhteellisen laajasta materiaali- vaihtoehtoista suoraan 3D CAD-mallista. Hiekkamuottien suora tulostaminen tekee mallivarusteet kokonaan tarpeettomiksi ja mahdollistaa vieläkin monimutkaisempien valujen valmistamisen.(17) Myös keernalaatikoiden suoran tulostamisen mahdollisuutta on tutkittu(18). Metallien suoralla tulostuksella voidaan taas valmistaa konstruktiorakenteita, jotka eivät millään muulla tekniikalla olisi edes mahdollisia, kuten esimerkiksi energiatehokkaita lämmönvaihtimia(kuva 1) autoteollisuuden tarpeisiin(17). 3D-tulostustekniikoita

käytetään lisääntyvissä määrin myös tuotannossa. 3D-tulostuksen käyttö tällä hetkellä tuotannossa on sitä kustannustehokkaampaa mitä monimutkaisempia valutuotteita valmistetaan ja pienillä sarjoilla pelattaessa. Yksinkertaisiin valugeometrioihin ei yleensä ole kannattavaa käyttää 3D-tekniikoita. Lisäksi 3D-printattujen rakenteiden tarkkuudet eivät ole vielä kaikilta osin riittäviä tuotannon tarpeisiin.(16, 19)



Kuva 1. 3D-tulostettuja erittäin energiatehokkaita lämmönvaihtimia.(17)

Parannellut, uusia ominaisuuksia sisältävät, suunnitteluohjelmat luovat lukemattomien uusien mahdollisuuksien määrän kehittää valutuotantoa nykyisestään. Tuotanto- ja valuprosessia voidaan optimoida erilaisin digitaalisin simulaatiomallein, mikä ympäristöystävällisyyteen painottuvassa kehityksessä auttaisi valimoita toimimaan yhä kustannustehokkaammin ja pienentämään ympäristörasitusta entisestään. Simuloimalla koko tuotannon prosessiketjua voidaan tuotantoa ohjata energia- ja materiaalivirtapainotteisesti toimimaan mahdollisimman energiatehokkaasti. Materiaalivirtaa voidaan tarkastella aina raaka-aineiden toimituksen, käytettyjen materiaalien laadun ja määrän, sulatus- ja ylläpitouunien käytön, valunsuunnittelun, valutekniikan, valusyklien, tuotelaadun, koneiden tehon, hukkalämmön, lämpökäsittelyn ja jälkikäsittelyjen näkökulmista. Erityisesti alumiinivalimoiden osalta energiatehokkuuden lisäämisessä olisi paljon potentiaalia. Energia- ja materiaalivirtoja simuloimalla valimot voisivat tunnistaa paremmin yksilölliset suurimmat energiakulutuskohteensa ja kehittää niitä. Energiavirtojen laskemiseen tarvitaan tosin paljon taustatietoa eikä kaikkia tietoja ole aina saatavilla tai ne eivät vastaa täysin todellisuutta.(20, 21) Valunsuunnittelun tasolla tietokoneohjatuilla simuloinneilla varmistetaan valun onnistuminen jo ennen kuin varsinaisia valmistuskustannuksia on edes ehtinyt syntyään. Valusimuloinneilla voidaan esimerkiksi varmistua muotin täyttyminen ja ennakoida huokoisuutta, minkä avulla taas vältetään useiden koevalusarjojen valmistukselta.(22) Valusimuloinneilla voidaan kuitenkin tehdä paljon muutakin eikä valimoissa tällä hetkellä oteta vielä koko simuloinnin potentiaalia irti. Esimerkiksi valukanavien ja syöttöjen optimoinnilla voidaan saavuttaa merkittäviä materiaalisäästöjä ja simuloitujen jäännösjännitysten huomioiminen koneistuksessa voisi tuoda huomattavaa lisäarvoa koneistajien ja valimon yhteistyössä.(20, 23)

Tuotantoautomaation lisääminen valimoissa tehostaa yksittäisiä tuotantoprosesseja, lisää kilpailukykyä ja ylläpitää valutuotteiden laatua. Automaation lisäämistä ajavat myös valimoympäristön työturvallisuuteen liittyvät näkökulmat, kuten sulan metallin käsittely, kuumien valutuotteiden käsittely, muoteista vapautuvat haitalliset kaasut ja valimoissa syntyvä pöly. On huomattu, että useimmissa valimoissa jopa yli 65 % valutuotteen valmistusajasta kuluu valutuotteen manuaaliseen käsittelyyn valutyöntekijöiden toimesta ja valutuotteen valmistuksen kokonaiskustannuksista noin 30 - 40 % koostuu tästä työvoiman käytöstä. Automaation vaikutukset tunnetaan, mutta vaativa tuotantoympäristö ja hyvin erilaiset valutuotevariaatiot rajoittavat kuitenkin siihen investoimista. Tästä syystä automaatioon investoivan valimon tulee miettiä tarkkaan, mitä tuotannon prosessia kannattaa edes automatisoida, jotta se olisi vaikutuksiltaan tehokkain mahdollinen. Lisätyllä automaatiolla pyritään lisäämään myös valimoiden joustavuutta. Haasteena joustavuuden lisäämisessä on edelleen tuotevariaatioiden suuri määrä, mikä vaatii yleensä automatisoitujen laitteiden päivittämistä uusiin asetuksiin erilaisille valutuotteille ja työkalujen vaihtamista uusiin. Asetusten ja työkalujen vaihtaminen uusiin voi olla, tapauksesta riippuen, hyvinkin paljon aikaa vievää.(14, 24) Tästä syystä valimoilla voi olla minimisarjavaatimuksia valutuotteen valmistukseen, jotta tuotanto olisi ylipäättään kannattavaa(16). Joustavan automaation lisäämiseen voidaan päästä esimerkiksi käyttämällä automaattisten laitteiden tai robottikäsien kiinnityksissä tarraimia, jotka mahdollistavat geometrialtaan hyvinkin erilaisten valukappaleiden käsittelyn. Samaan voidaan päästä myös automatisoimalla työkalunvaihdot. Modulaarisuuden lisääminen lisää myös tuotannon joustavuutta. Valutuotteiden, muottien ja keernojen kuljetukseen valimon sisällä voidaan joutua käyttämään tuotekohtaisia erikoislavoja, jotta tuotteet säilyvät ehjinä tuotannossa. Kehittämällä kuljetukseen soveltuvia modulaarisia kuljetusratkaisuja, jotka kattaisivat useampia tuotevariaatioita, ei yksilöllisiä ja tuotekohtaisia tuotekuljettimia tarvitsisi. Samoin voidaan pyrkiä modulaarisiin ratkaisuihin esimerkiksi valutyökalujen ja jigien kehittämisessä, jolloin automaattiset koneet pystyisivät käsittelemään yhä useampia tuotevariaatioita samoilla perusosilla ja työkalujen vaihdot sujuisivat nopeammin.(24)

Uusin merkittävä globaali trendi myös valutuoteteollisuudessa on digitaalisuuden ja sitä kautta älykkyyden lisääminen valimoissa. Digitaalisuuden avulla pyritään yhdistämään kaikki valutuotannon osa-alueet ja edellä mainitut kehityssuunnat yhteen. Älykkyyden lisäyksellä valimoissa voidaan muun muassa parantaa ja optimoida kaikkia valutuotannon prosesseja, lisätä joustavuutta, nopeuttaa tuotantoa ja tehostaa energian ja materiaalin käyttöä. Älykkään valimon(*engl. smart foundry*) toiminta perustuu dataan, joka kerätään esimerkiksi valimon yksittäisistä tuotannon prosesseista, suunnitteluvaiheen tiedoista ja palautteesta niin tuotannosta kuin asiakkailta. Kerättyä dataa prosessoimalla voidaan tehostaa niin yksittäisiä valuprosesseja kuin kokonaisprosessia ja kehitys voi olla niin reaaliaikaista kuin pidemmällä aikavälillä tapahtuvaa. Jotta datan keräys olisi mahdollisimman tehokasta ja saavutettava hyöty paras mahdollinen, tarvitsee älykäs valimo toimiakseen myös niin sanottuja ”älykkäitä valuja”. Tällä tarkoitetaan valuja, jotka ovat vuorovaikutuksessa tuotannonohjausjärjestelmien ja tuotantolaitteiden kanssa alusta alkaen valun valmistuksen jokaisessa tuotantovaiheessa ja aina asiakkaalle asti, tarkoituksena säilyttää valutuotteen jokainen tuotannon prosessivaiheen tapahtuma yksityiskohtineen ja kulloinenkin status. Kerätyn datan avulla valutuotteeseen voidaan saada merkittävää lisäarvoa niin valimon kuin valimoasiakkaan näkökulmista.(6, 10)

3.2. Valimon toiminta

Valimosta riippumatta ovat valimoiden prosessiketjut pääpiirteiltään samankaltaisia keskenään itse valukappaleen suunnittelusta aina valun viimeistelyyn asti. Valutapoja on monia erilaisia ja jokaisella valutavalla on omat erikoispiirteensä ja rajoituksensa, joilla valukappaleelle pyritään muodostamaan parhain mahdollinen suorituskky ja käyttöön sopivat ominaisuudet. Valutuotteen valmistuksessa jokaisella prosessivaiheella on vaikutusta valutuotteen lopullisiin ominaisuuksiin. Tämän kappaleen tarkoituksena on käydä valimon tuotannon prosessiketju pääpiirteissään läpi perehtymättä tarkemmin eri yksittäisten prosessivaiheiden yksityiskohtiin tai erikoispiirteisiin. Valimoiden prosessiketjun kokonaiskuvan hahmottaminen edesauttaa ymmärtämään seuraavien kappaleiden aiheiden merkitystä koko tuotantoketjussa.

3.2.1. Valimon tuotantoketju

Valukappaleen tuotantoprosessi alkaa valutuotteen suunnittelusta, jossa määritellään valukappaleen muoto, materiaali, toiminnalliset piirteet sekä mekaaniset ominaisuudet. Lopulliset mekaaniset ominaisuudet ovat kuitenkin riippuvaisia itse valutavasta ja jälkikäsittelyistä. Itse suunnittelu toteutetaan nykyään 3D-suunnittelun mahdollistavilla CAD-ohjelmilla. Suunnittelussa tulisi huomioida tarvittavat päästöt eli hellitykset valutyökaluissa tai valuissa niiden muoteista tai muottityökaluista irrotuksen helpottamiseksi. Valukappaleen sisäisiä onkalomuotoja suunniteltaessa tulisi tietää onko kyseinen muoto edes mahdollinen toteuttaa suunnitellulla valutavalla, koska keernojen käyttö ei ole vaihtoehto kaikissa valuprosesseissa. Jo suunnitteluvaiheessa olisi hyvä huomioida myös koneistus lisäämällä kappaleeseen paikoittamista ja kiinnittämistä helpottavia piirteitä(25). Valukappaleen suunnitteluprosessin ensimmäinen kierros päättyy muottien, keernojen, suodatuksen, täyttö- ja syöttökanavien suunnitteluun. Muottien ja keernojen 3D-suunnittelu onnistuu helpoiten boolean -operaatioita käyttämällä hyödyntäen jo valmiita valukappaleen ja valukanavien 3D-malleja.

Suunnittelun jälkeen on vuorossa valutapahtuman simulointi valitulla simuloinnin mahdollistavalla ohjelmalla suoraan CAD-ohjelman 3D-mallista. Simuloinnin tarkoitus on varmistaa suunnitellun valujärjestelmän toiminta tuotannossa ja estää näin valuvikojen muodostuminen tai valun hylkääminen itse varsinaisessa tuotannossa. Simuloinnin tulosten perusteella tehdään mahdolliset muutokset alkuperäiseen valusuunnitelmaan ja simulointi suoritetaan tarvittaessa uudelleen toiminnan varmistamiseksi. Simuloinnilla yksinään ei ole mitään merkitystä valun onnistumisen kannalta, mutta yhdistettynä valutuotteen suunnitteluun se voi säästää merkittävästi tuotannon kustannuksia. Simulointia osana valutuotesuunnittelua hyödynnetään yhä tehokkaammin uuden valutuotteen tuotantoketjussa valimoissa.

Onnistuneiden suunnittelu- ja simulointivaiheiden jälkeen voidaan aloittaa muottien valmistus. Valutekniikasta riippuen valumalli tai varsinainen muotti joko koneistetaan valitusta materiaalista tai vaihtoehtoisesti valmistetaan jollakin materiaalia lisäävistä menetelmistä. Valumalleja tarvitaan kertamuottimenetelmissä kuten esimerkiksi tarkkuusvaluissa keraamimuottien valmistuksessa ja hiekkavaluissa hiekkamuottien kaavaukseen. Valumal-

lien materiaaleina voidaan käyttää puuta, muovia, metallia, styroxia, vahaa tai kipsiä käyttötärpeen mukaan. Kestomuoteilta vaaditaan parempaa suorituskkyä joten ne valmistetaan kestävimmistä metalliseoksista.(26)

Kun valutuotteen valmistamisen mahdollistavat työkalut ovat valmiit, voidaan aloittaa itse tuotanto metallin sulatuksella ja sulankäsittelyllä. Sulatukseen on käytössä useita eri uunityyppejä ja uunikokoja. Induktiouuni on yksi tavallisimmista ja soveltuu kaikkien metallien sulatukseen. Sulan raaka-aineina käytetään harkkoja, metalliromua ja lisättyjä seosaineita. Sulatettu metalli ei yleensä sellaisenaan johda haluttuihin ominaisuuksiin valussa vaan sulan laatua parannetaan sulankäsittelyin, joilla voidaan esimerkiksi poistaa sulasta epäpuhtauksia, alentaa sulan kaasupitoisuutta tai säädellä hiilipitoisuutta. Lisäksi erilaisilla lisäaineilla voidaan vaikuttaa sulan kiteytymisnopeuteen valun jälkeen, jolloin raekokoa ja sitä kautta mekaanisia ominaisuuksia voidaan säädellä.(26)

Sulankäsittelyn jälkeen suoritetaan varsinainen valu. Valu tapahtuu joko kaatamalla sulaa senkasta suoraan valumuottiin tai injektoimalla sulaa jollain muulla menetelmällä muottiin. Taas valun lopulliset ominaisuudet riippuvat valumenetelmästä. Juuri ennen valutapahtumaa voidaan sula vielä kuonata ja kaadon aikana sulankäsittelyaineita voidaan lisätä. Kun sula on jähmettynyt muottiin ja jäähtynyt tarpeeksi, voidaan muotti purkaa ja valu puhdistaa. Muotin purkaminen hoidetaan käsin tai koneellisesti. Koneellisessa purkamisessa voidaan käyttää erilaisia työntölaitteita ja erityisesti hiekkamuotteihin voidaan käyttää jonkinlaisia tärystimiä ja sinkopuhdistusta. Muottien irrotuksen jälkeen valukanavisto, purseet, ja mahdolliset syöttökuvut poistetaan sekä mahdolliset muottien ja keernojen jäämät irrotetaan. Valu on parhaimmillaan heti valmis käyttökohteeseen, kun valussa käytetyt valukanavistot on poistettu.(26)

Tarpeen mukaan valuille tehdään vielä erilaisia jälkikäsittelyjä, kuten liitos- ja viimeistelyhitsauksia, lämpökäsittelyjä, pintakäsittelyjä, koneistusta, tarkastusta, testausta ja mitausta. Jälkikäsittelyissä tulee huomioida, että esimerkiksi kaikki valumateriaalit eivät ole hitsattavissa ja lämpökäsittelyt voisivat valutekniikasta riippuen merkittävästi heikentää valutuotteen ominaisuuksia tai valutuote ei sovellu ollenkaan lämpökäsitteltäväksi. Valujen tarkastukseen voidaan silmämääräisen tarkastuksen lisäksi käyttää erilaisia rikkomattomia tarkastusmenetelmiä, kuten ultraääni-, tunkeumaneste-, röntgen- ja magneettijauhetaustusta. Mekaaniset ominaisuudet voidaan varmistaa valusta valmistettujen koesauvojen tai näytepalojen avulla. Valumittojen tarkastukseen voidaan käyttää mekaanisia mittalaitteita, mutta nykyään mittaukset suoritetaan yhä useammin automaattisten skannauslaitteiden avulla vertaamalla valutuotteesta skannattua 3D-mittamallia alkuperäiseen 3D-malliin.(16, 26)

3.3. Valutuoteteollisuus Suomessa

Suomen valutuoteteollisuuden nykytilan kartoittamiseksi ja erityisesti valimoiden tämän hetkisen digitaalisuuden tason selvittämiseksi on tämän kappaleen lähteinä käytetty muun muassa muutaman valutekniikoiltaan erilaisen suomalaisen valimon yritysvierailuissa hankittuja haastattelumateriaaleja. Yritysvierailujen kohteeksi valittiin hiekkavalu-, tarkkuus-

valu- ja matalapainevalutekniikoilla valutuotteita tuottavat kolme eri yritystä. Haastattelujen pohjana eri yrityksissä käytettiin soveltuvin osin liitteen 1 haastattelurunkoa. Tarkoituksena oli selvittää millaiset lähtökohdat yleisesti suomalaisissa valimoissa on digitaalisuuden lisäämiseen, mitä digitaalisia ja älykkäitä menetelmiä on jo otettu käyttöön ja mitkä ovat ne valimokohtaiset valutuotannon arvoa lisäävät odotukset, joita lisätty digitaalisuus voisi tuoda mukanaan. Lisäksi kappaleessa kerrotaan valutuotannon tilasta Suomessa yleisesti.

3.3.1. Valutuotannon nykytila

Vuonna 2015 Suomessa toimi 32 valimoa, joiden kokonaistuotannoksi kirjattiin 65 260 tonnia vuodelle 2015. Kokonaistuotanto väheni 6,9 % vuoteen 2014 verrattuna. Rautametallivalujen osuus kokonaistuotannosta oli 59 106 tonnia, kun ei-rautametallisten valujen osuus jäi 6 229 tonniin. Rautametallivaluja Suomessa tuotti yhteensä 17 eri valimoa, jotka työllistivät 1354 henkilöä ja ei-rautametallisia valuja tuotti yhteensä 15 eri valimoa työllistäen 376 henkilöä. Rautametallivalujen osalta pudotusta edellisvuoteen verrattuna oli 6,6 % ja ei-rautametallisten valujen osalta tuotanto väheni yhteensä 9,5 %. Tarkkuusvalujen tuotantomääriä ei näihin tilastoihin ole lisätty, koska kansainvälisesti tarkkuusvalujen tuotanto ilmoitetaan dollareissa. Suomessa tarkkuusvaluja valaa kaksi valimoa.(9)

Taulukko 3. Rautametallivalujen osuus vuoden 2015 kokonaisvalutuotannosta ja muutokset edellisvuoteen.(9)

	Pallografiitti-valut	Suomugrafiitti-valut	Teräsvalut	Ei-rautametalliset valut
Osuus [%]	49	22	19	10
Osuus [tonnia]	32 053	14 468	12 509	6229
Muutos edellisvuoteen [%]	- 3,2	- 15,9	- 3,4	- 9,5

Taulukko 4. Ei-rautametallisten valujen eriteltyt osuudet vuoden 2015 ei-rautametallisten valujen kokonaistuotannosta ja muutokset edellisvuoteen.(9)

	Pronssi-valut	Al, hiekka- ja kokillivalut	Al, painevalut	Messinkivalut	Sinkkivalut
Osuus [%]	41	18	23	14	1
Osuus [tonnia]	2829	1098	1142	1074	86
Muutos edellisvuoteen [%]	+ 1	- 13,7	- 27,9	+ 1,1	- 65,6

Valutuotanto Suomessa on ollut tasaisessa laskusuunnassa vuodesta 2011 lähtien tuotannon kokonaislaskun vuosien 2011 – 2015 välissä ollen yhteensä 34 %. Valujen materiaali-kohtainen tuotannon väheneminen vuonna 2015 on ollut hyvin epätasaista. Suomugrafiittivaluraudan valmistajat menettivät jopa 15,9 % tuotantovolyyymistaan, kun muiden materiaalien osalta tuotannon lasku on ollut maltillisempaa. Ainoat materiaalityryhmät, joissa tulos kasvoi, ovat kupariseoksiin kuuluvat pronssi- ja messinkivalut, joiden tuotanto kasvoi maltillisesti molemmilla noin 1 %.(9) Taulukoista, 3 ja 4, voi havaita valutuotannon materiaali-kohtaiset osuudet Suomessa vuonna 2015 ja muutokset vuoteen 2014 verrattuna.

3.3.2. Käytännön toimintamallit

Suomalaiset valimot eivät tuotantovolyymillaan pysty kilpailemaan maailman suurien valutuottajien kanssa ja valutuotannon säilyttämiseksi Suomessa täytyy suomalaisten valimoiden panostaa muuntautumiskykyynsä vastatakseen asiakkaiden moniin tarpeisiin sekä valutuotteidensa laatuun. Joustavan ja tehokkaan valutuotannon yhdistäminen on kuitenkin hankalaa eikä siihen ole yhtä oikeaa ratkaisua. Haastateltujen valimoiden osalta joustavuutta on pyritty lisäämään muun muassa omalla valumateriaaliseostuksella, jolloin edullisesti, pääosin konepajoilta tai suoraan toimittajilta, hankittua romumetallia seostetaan valimossa paikanpäällä seosaineiden avulla ja sulan laatua voidaan tarkkailla omilla alkuai-
neanalysaattoreilla. Tämä mahdollistaa laajemman materiaalityön ja seoslaatu-
jen tarkkailun asiakkaiden tuotteisiin. Yleisesti liian laajaa materiaalityötä valimot kuitenkin välttelevät, koska eri valumateriaaleja ei luonnollisesti voi käyttää montaa samanaikaisesti käytettävän sulatusuunikapasiteetin takia ja usein tiettyjä valuseoksia ei voi sulattaa samassa uunissa heti perään, kun siinä on sulatettu jotain toista valuseosta. Laaja materiaalityön vaatii siis enemmän materiaalityökohtaisia sulatusuuneja ja sulan kuljetusastioita, mikä tietää taas lisää investointeja ja monien erilaisten materiaalityövirtojen hallitsemista tuotannossa.(16, 27, 28)

Materiaalin sisäinen kierrätys suomalaisissa valimoissa on yleisesti hyvällä pohjalla. Haastatellussa hiekkavalimossa kaikki hiekkamuotteihin käytetty hiekka samoin kuin vialliset valutuotteet ja niistä irrotetut valujärjestelmät kierrätetään uudelleen käyttöön. Ainoastaan keernahiekkaa ei kierrätetä. Haastatellussa tarkkuusvalimossa niin muotteissa käytettyä vaha-
haa kuin keraamista muottimateriaalia kierrätetään. Muottivahan osalta kierrätykseen ei ollut erikoissäätelyä vaan kierrossa oleva vaha vaihdetaan kokonaan uuteen mikäli valutuotteissa syntyvien pintavikojen määrä ylittää sallitun rajan. Tarkempia kierrätysasteita tai kierrätysmenetelmiä ei haastatteluissa selvitetty, mutta yleisesti voidaan sanoa, että kaikki hylätyt valutuotteet ja valujärjestelmien osat päätyvät sisäiseen kiertoon valimoissa.(16, 27, 28)

Materiaalia lisäävien 3D-teknologioiden käyttö haastatteluissa valimoissa yllätti positiivisesti. Haastattelijan mielikuva materiaalia lisäävien teknologioiden tämän hetkisestä suori-
tuskäytöstä oli se, että ne soveltuvat valimoissa vain protokäyttöön 3D-tulosteiden liian kar-
hean pinnanlaadun tai heikompien lujuusominaisuuksien takia. Jokaisessa haastatellussa valimossa 3D-tulosteita on kuitenkin jossain määrin käytetty tuotannossa ja käytetään sa-
tunnaisesti edelleen, joko valutyökaluina tai suoraan valmiiksi tulostettuina muotteina. Esi-
merkiksi haastatellussa hiekkavalimossa on tänä vuonna käytetty muutamia kymmeniä hiekkatulostettuja muotteja muun tuotannon ohella, tarkkuusvalimolta löytyi kaksi esi-
merkkiä valutuotteista, joista ei ole olemassa fyysisiä muottimalleja muottien valmistuk-
seen ja matalapainevaluja valmistavassa yrityksessä 3D-tulostinta oli käytetty muun mu-
assa jigien valmistuksessa. 3D-tulosteiden käyttö tuotannossa on edelleen marginaalista, mutta todistettavasti 3D-tulostusteknologiat ovat jo niin kehittyneitä, että ne pystyvät vas-
taamaan jo osaan valimoiden laatuvaatimuksista. Osalla valimoista löytyi myös omia 3D-
tulostimia, joita käytettiin pääasiassa protoihin tai ne olivat lähes käyttämättöminä, koska eivät tuotelaadultaan riittä valimon tarpeisiin. Yleisesti valimoiden 3D-tulosteet oli kuitenkin hankittu alihankintana. Suuren alkuinvestoinnin lisäksi ylläpitokustannukset ja sopivan tilan

löytäminen vaikuttaisi olevan esteenä omien 3D-tulostimien hankintaan suomalaisissa valimoissa. Tuotekehitysvaiheissa 3D-tulostus on kuitenkin otettu näkyvästi hyötykäyttöön. Kiinnostusta suorituskyvyltään laadukkaampiin 3D-tulostimiin on ja uusia sovelluskohteita niiden käyttöön etsitään.(16, 27, 28)

Automaatiota suomalaisissa valimoissa pyritään lisäämään jatkuvasti tuotannon tehostamiseksi ja tuotteiden laadun parantamiseksi. Haastatelluissa valimoissa oli monenlaisia työvaiheita korvattu automaattisilla roboteilla ja koneilla. Robotisoidun automaation kohteena olivat yleensä suuremman volyymin tuotteet. Automaatiota pyrittiin myös tehostamaan siten, ettei tiensä päähän tulleita automaattisia tuotantolaitteita vain korvata uudella samanlaisella vaan niihin pyritään samalla lisäämään jokin uusi automaattinen ominaisuus. Esimerkiksi matalapainevaluja tuottavassa yrityksessä oli valujen koneistuksen yhteyteen lisätty yksinkertainen automaattinen leikkausoperaatio ennen koneistusta, mikä toimenpiteenä tehostaa tuotantoa hieman entisestään.

Valimoiden digitaalisen valmiuden selvittämiseksi, tutkittiin myös automaation osalta mitä dataa eri automaattiset tuotantolaitteet valimoissa tarvitsevat, kuinka asetuksia säädetään ja mitä tietoa jää talteen. Yhteenvetona voidaan sanoa, että valutuotannossa tarvittavan ja siellä liikkuvan datan määrä on mittava ja monia eri prosessiparametreja tarvitaan. Datan käsittelyssä ja sen tehokkaasta käytöstä löytyi tosin paljon vaihtelua valimoiden välillä. Yleensä koneiden asetukset tuli manuaalisesti säätää uudelleen tuotevaihdossa eikä edelliset asetukset jääneet mitenkään muistiin niin, että niitä voitaisiin enää yhdistää tiettyyn tuotteeseen. Lisäksi joidenkin tuotantolaitteiden asetuksista saattoi vaatia vähän oikeiden asetusten hakemista testaamalla. Tuotantopisteiden koneiden asetuksiin saattoi tosin tulla ohjeet tuotekohtaisten valmistuskorttien mukana. Kaikissa tuotantolaitteissa asetusten säätämistä ei tosin nähty ongelmallisena vaan suuren osan ajasta vei ennemminkin fyysinen työkalun vaihtaminen. Haastatellussa hiekkavalimossa oli kuitenkin esimerkiksi erillisenä toiveena hiekkalämpötilan vakiointi, jotta hiekkaa käyttävien koneiden parametrit voitaisiin vakioda. Kyseisessä valimossa myös suurin yksittäinen valutuotteiden romutukseen johtuva syy on valujen hiekkavirheissä, joten hiekkalämpötilan vakiointi voisi johtaa myös hiekkavirheinen vähenemiseen.(16, 27, 28)

Asiakasrajapinnan suhteen valimoissa löytyy kehitettävää. Pääasiallinen viestintä asiakkaiden ja toimittajien kanssa tapahtuu sähköpostilla ja puhelimitse. Tiedostojen, kuten esimerkiksi valutuotteiden CAD-mallien, jakaminen tapahtuu pääasiassa sähköpostilla, ellei sitten asiakkaalla ole käytössä jokin tiedostojen jakamiseen tarkoitettu portaali. Vaikka tiedostojen jakaminen asiakasportaalissa voi olla tehokkaampaa, kun portaalin avulla voidaan tavoittaa helpommin suurempi käyttäjäryhmä, ei haastateltujen valimoiden mukaan portaalit ole toimivia ilman erillisiä ilmoituksia tiedostojen päivittyessä. Tiedostoja ei muuten osata kaivata asiakasportaalista. Joillakin valimoiden asiakkaila oli kuitenkin käytössä asiakasportaalit, joka lähettää automaattisesti sähköpostiin ilmoituksen tiedostopäivityksistä. Valutuotteen designvastuu on pääasiassa asiakkaalla ja valimoiden vastuulla on ainoastaan valunsuunnittelu, mikäli valimo ei tuota omia valutuotteita. Designehdotuksia valimot kuitenkin tarjoavat. Yhteistyö valimon ja asiakkaan välillä voisi kuitenkin olla avoimempaa, koska valimolla ei aina tiedosteta asiakkaan valutuotteen lopullista käyttötarkoitusta ja valutuotteeseen voidaan tästä syystä tehdä paljon tarpeettomia toimenpiteitä valutuotteen

laadun varmistamiseksi asiakkaan vaatimusten mukaisiksi. Esimerkkinä voi olla yksittäisen valutuotteen osan laadun varmistaminen valimossa, mutta jonka asiakas kuitenkin koneistaa kokonaan pois lopullisessa käyttötarkoituksessa. Ilmoitukset mahdollisista toimitusaikojen viivästyksistä tehdään asiakkaalle heti niiden ilmaantuessa eikä luottamusta asiakkaan ja valimon välillä haluta näin heikentää yhtään pimittämällä toimituksen tietoja. Asiakkaan näkökulmasta tietoa asiakastilauksen tarkemmasta etenemisestä tuotannon vaiheissa ei ole käytännössä mahdollista seurata. Jos asiakas haluaa tarkemmin tietää missä vaiheessa tuotantoa tilaus etenee, voi asiaa yrittää tiedustella valimoiden myynniltä. Reklamaatioihin haastatelluissa valimoissa oli usein käytössä jokin reklamaatiopohja. Ainakin yhdessä haastatelluissa valimoissa myös tarkastetaan tietyn väliajan jälkeen, että reklamaatioon on myös vastattu eikä näin ollen reklamaatioiden ole mahdollista jäädä roikkumaan selvittämättöminä. (16, 27, 28)

3.3.3. Valujen tunnistaminen

Digitaalisia valmiuksia suomalaisissa valimoissa tutkittiin kartoittamalla valujen seuranta- ja tunnistusmenetelmiä haastateltujen valimoiden tuotannossa sekä selvittämällä mitä dataa voidaan saada irti yksittäisestä valutuotteesta tai tilauksesta. Lisäksi seurattiin miten dataa liikutellaan valimon sisällä ja asiakkaiden kanssa. Yleisesti ottaen tilaustietojen liikutteluun käytetyt tuotannonohjausjärjestelmät olivat yhteydessä tuotantopisteisiin pisteisiin sijoitettujen näyttöpäätteiden avulla. Tuotannossa olevien tilausten tiedot olivat näkyvissä näyttöpäätteissä, mutta myös tulostettuja valmistuskortteja liikkui tuotantopisteissä. Valutuotteiden seuraaminen tuotannonohjausjärjestelmässä ei ollut mitenkään reaaliaikaista vaan lähinnä pystyi seuraamaan minkä tuotantovaiheen valutuote on jo ohittanut. Valutuotteen status ei silloinkaan aina ollut täysin pitävä, koska tiedon siirtyminen tuotannonohjausjärjestelmään riippui usein myös manuaalisen raportoinnin ajankohdasta. Valmistuskorteista saatiin tuotantopisteille tilaustietoja, työohjeita ja joitakin koneiden asetuksia. Yhdessä valimossa valmistuskortit luettiin viivakoodinlukijalla, jolla yksityiskohtaiset työohjeet ja tilausta koskevat tiedot saatiin näyttöpäätteelle helposti. Työohjeet sisälsivät aina myös seikkaperäisen demovideon työpisteellä tehtävistä toimenpiteistä valmistuskortin tuotteelle, mitä pidettiin valimossa merkittävänä parannuksena työntekijöiden ohjeistuksessa. Valimoissa, joissa viivakoodinlukijat olivat käytössä tuotannossa, käytettiin lukijoita hyödyksi myös erilaisten tuote-erien helpompaan lukemiseen ja tietojen siirtelyyn käyttölaitteisiin. Tällöin manuaalinen kirjaaminen jäi vähäisemmäksi, koska yleensä ainoa asia, jonka joutui manuaalisesti kirjaamaan, oli käyttölaitteelle ilmoitettava valutuotteiden kappalemäärä. (16, 27, 28)

Yksittäisen valun merkitsemistapa oli paljolti valun koosta ja asiakkaan vaatimuksista riippuvainen. Pienissä valuissa ei yksilöllisiä merkintätapoja ollut käytössä lainkaan vaan merkinnät löytyivät kulloinkin käytössä olleiden valukappaleiden kuljetusastioista, jotka sisälsivät useita kappaleita samanlaisia valutuotteita. Kokoluokaltaan suuremmissa valuissa oli käytössä vain erä-/tilausnumeroita, valmistusviikko tai valmistuspäivä ja -vuoro. Merkinnät olivat yleensä sellaisia, että niillä voidaan selvittää ainoastaan valuerä, mutta ei paljon muuta. Valutuotteiden merkinnöistä ei saanut esimerkiksi selville onko valu tuotettu sulan alku-, keski- vai loppuerästä tai onko kyseiselle valutuotteelle jouduttu tekemään joitain erikoistoimenpiteitä. Asiakkaalle valimoiden omat merkintätavat valuissa eivät yleensä

kerro mitään ellei asiakas sitten erikseen vaadi lisämerkintöjä tuotteisiinsa. Kertamuottimenetelmiä käyttäneissä valimoissa ei muotteihin ollut käytössä mitään kiinteitä merkin-tätapoja yksittäisten muottien tunnistamiseksi. Haastatellussa hiekkavalimossa saatettiin valun jälkeen tehdä valujärjestelmän kuusaan(kuva 3) merkintä tietyn valun tunnistamiseksi muista ennen siirtoa jäähdytysradalle. Keernoja varten ei myöskään ollut erillisiä merkintätapoja. Keernojen kuljetuslavat usein merkittiin.(16, 27, 28)

Dataa liikkuu valimoiden tuotannossa paljon, mutta suuri osa myös katoaa matkan varrella. Susikappalemääriä ja niiden syitä valimoissa yleisesti seurataan, mutta tarkempien tilaus-tai eräkohtaisten tietojen kerääminen oli yleensä heikompaa. Ainakin yhdessä haastatel-luista valimoista yksityiskohtaisemman datan keräämistä oli kuitenkin suoritettu jo kym-menisen vuotta. Dataa oli kerätty tilauskohtaisesti muun muassa susikappalemääristä, vir-heen laaduista ja niiden määristä, kustannuksista, työtapahumista, sulaeristä, työtun-neista ja niiden kustannuksista, muottimääristä, muottirakenteesta, käytetystä materiaali-määrästä, työntekijöistä, paljonko tuotteita on keritty tehdä ja paljonko on vielä tekemättä. Valimossa kerättyä dataa ei kuitenkaan käytetä muuten kuin lähinnä tilastointiin ja tilaus-seurantaan. Muiden valimoiden osalta ei täysin selvinnyt onko dataa kerätty vastaavalla tarkkuudella. Kaikkien haastateltujen valimoiden osalta tuotekohtaisia tuotantolaitteiden yksityiskohtaisia asetuksia ei jäänyt muistiin, kuten jo aiemmin todettiin, vaikka koneiden asetukset olivat hyvin usein tilauskohteesta riippuvaisia.(16, 27, 28)

3.3.4. Digitalisaation nykytilanne ja odotukset

Yhteenvetona voidaan sanoa, että suomalaisissa valimoissa on yleisesti keskitytty valimon ydinosaamiseen luomalla hyvä ja toimiva alihankintaverkosto. Osaa tuotannon prosesseja on tehostettu digitaalisin keinoin. Esimerkiksi valutuotteen mittauksissa ja tarkastuksissa mekaaniset mittalaitteet ovat jääneet lähes käyttämättömiksi ainakin yhdessä haastatel-luista valimoista, kun mittaukset suoritettiin nykyään 3D-skannauslaitteella. 3D-skanneria on käytetty myös niin sanotussa takaisinmallinnuksessa(*engl. Reverse engineering*), jossa jo olemassa olevasta valutuotteesta luodaan 3D-malli, mikäli 3D CAD-mallia kyseisestä tuotteesta ei ole saatavilla. Tuotekehityksessä ja pienimuotoisesti myös tuotannossa käy-tetään yhä kasvavissa määrin nopeita 3D-tulostustekniikoita. Tuotantoautomaatiota suo-malaisissa valimoissa pyritään aktiivisesti lisäämään kokonaan uusilla koneinvestoinneilla ja uusien automaattisten toimintojen lisäämisellä jo olemassa oleviin ratkaisuihin. Valun-suunnittelu jonkin asteista valusimulointia hyödyntäen on ollut käytössä kaikissa haastatel-luissa valimoissa. Kehittyneempien simulointiohjelmien optimointityökalut eivät haastatel-luissa valimoissa ole olleet käytössä, mutta niiden tuomista mahdollisuuksista ollaan kiin-nostuneita. Tällä hetkellä digitaalisuuden lisääminen on rajoittunut vain yksittäisiin toimin-toihin valimoissa eikä uusia digitaalisia järjestelmiä ole suunniteltu toimimaan samalla alus-talla tai keskenään. Valutuotteiden yksilölliset merkinnät ja merkintöihin sisällytettävä tieto on haastatelluissa valimoissa hyvin rajallista. Haastateltujen valimoiden mukaan asiakkailta tulee aika ajoin kyselyjä yksittäisten valutuotteiden valuparametreista, mutta valimot eivät ole pystyneet tarjoamaan näitä tarkempia tietoja valutuotteista, koska tietoja ei yksinker-taisesti ole tallennettu tai tallennettuja tietoja ei voi enää myöhemmin yhdistää tiettyyn valutuotteeseen. Kiinnostusta uusiin valutuotteiden merkintätapoihin, joilla yksityiskohtai-

semmat tiedot valutuotteen tuotantohistoriasta saadaan talteen, ja joilla valutuotteen tunnistaminen helpottuu, kuitenkin on. Uudet merkintätavat eivät saisi merkittävästi tuoda lisäkustannuksia ja olisivat toteutukseltaan yksinkertaista liittää jo olemassa olevaan tuotannon prosessiin. Toiveissa on ollut esimerkiksi elektronisesti luettavia tunnistusmenetelmiä, joilla valun voisi helposti tunnistaa valimolta lähteneeksi tuotteeksi, ja samalla yksityiskohtaisemmat tiedot voitaisiin tunnisteiden avulla hakea tallennettuna tietokannasta. Digitaalisuuden lisäämisen odotuksia valimoissa on erityisesti asiakasrajapinnassa, jossa digitaalisuuden toivotaan tuovan avoimuutta asiakkaan ja valimon suunnitteluyhteistyöhön tai rinnakkaissuunnitteluun. Dataa toivotaan yleisesti jäävän enemmän talteen siten, että valutuotteen tietoja voisi yhdistää keskenään ja löytää valutuotteessa ilmenevien ongelmien perimmäiset syyt. Esimerkkinä voisi olla keurnojen, muottien tai yksittäisten tuotannon prosessien työtekijöiden yhdistäminen yksittäisiin valutuotteisiin reaaliaikaisemman ja kohdistetumman palautteen antamiseksi tuotannolle. Muita yksityiskohtaisempia valimokohtaisia digitaalisia ratkaisutoiveita haastatelluissa valimoissa löytyi valujen reaaliaikaisen seurannan mahdollistavasta graafisesta näkymästä aina automaattiseen valumallivarastoon. Haastatelluissa valimoissa digitaalisuuden odotetaan lisäävän tehokkuutta monella eri osa-alueella ja helpottavan valimoiden toimintaa yleisesti.(16, 27, 28)

4. Valutuotannon digitalisointi

Valutuotannon digitalisointi vaatii valutuotteiden ja niiden valmistuksessa tarvittavien työkalujen muuntamista interaktiivisiksi, tuotannon prosessilaitteiden kanssa keskusteleviksi, dataa kerääviksi ja jakaviksi prosessitekijöiksi. Tavoitteena on, että jo suunnitteluvaiheessa valutuotteeseen lisätään tuotannon prosessivaiheiden toimintoja helpottavia tietoja, jotka siirtyvät automaattisesti valutuotteesta prosessilaitteisiin. Prosessivaiheista taas siirretään metadatta takaisin valutuotteeseen ja/tai digitaaliseen muistiin, digital twin:iin, joka on valutuotteen yksilöllinen valutuotetiedoista, tuotantovaiheista ja niissä käytetyistä parametreista koostettu virtuaalinen kopio, jota taas voidaan käyttää myöhemmissä analyyseissä esimerkiksi valutuotteen kehitykseen valimon tai asiakkaan näkökulmista. Nopea tiedon siirto valutuotteen tuotantotapahtumista mahdollistaa reaaliaikaisen seuraamisen ja ennakkoinnin tulevista tapahtumista parhaimmillaan vain monitoria seuraamalla. Kaikkea valutuotteen vaiheista saatua dataa voidaan käyttää niin reaaliaikaisesti kuin myöhemmissä vaiheissa liiketalouden, tuottavuuden tai luotettavuuden kannalta. Syvempien dataan perustuvien analyysien avulla on mahdollista tehdä nopeampia ja parempia tuotannollisia päätöksiä. Datan keräyksellä mahdollistettavien uusien liiketoimintojen haasteena on edelleen datan hyödyntäminen siten, että asiakas on valmis niistä maksamaan. Avoimemman digitaalisen alustan käyttö mahdollistaisi myös tehokkaamman yhteistyön kumppaniverkoston kanssa, mutta ongelmana on tässäkin löytää sujuva yhteistyömalli, joka hyödyttäisi kaikkia osapuolia.(3, 6, 29, 30)

Yhtä yleispätevää digitalisoinnin ratkaisua ei valutuoteteollisuudelle ole tarjolla, vaan valimon digitalisoimiseksi täytyy tehdä perusteellinen kartoitus valimon yksilöllisistä toimintatavoista ja prosessivaiheisiin tarvittavista tiedoista. Perusteellisella kartoituksella tunnistetaan valimon toiminnan edellyttävä perusdata ja tämän perusteella voidaan muodostaa

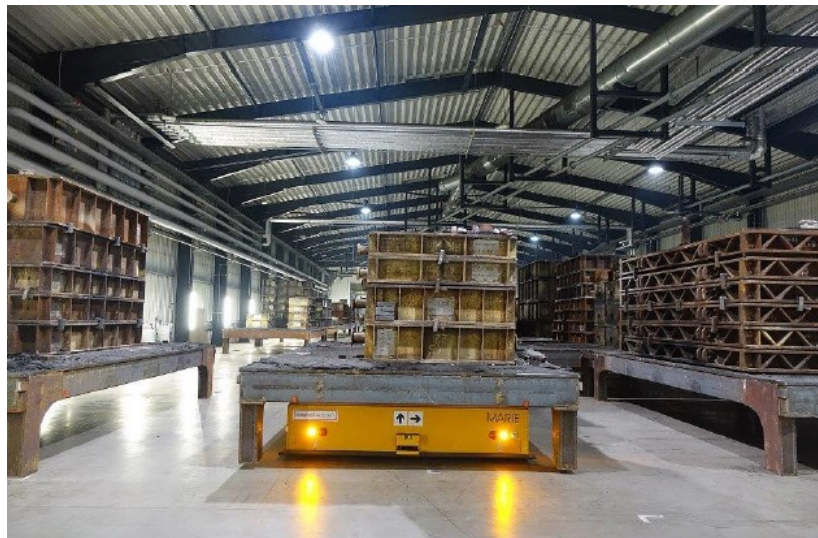
valimon toiminnallinen malli. Toimintamallin perusteella voidaan taas suunnitella yksittäisten prosessivaiheiden digitaalista integrointia kokonaistoimintamalliin ja miettiä yksittäisissä prosessivaiheissa tarvittava data, vaiheista kerättävä data ja miten datan haku, keräys ja siirtäminen voitaisiin käytännössä toteuttaa.(14) Onnistuneella datan keräyksellä ja siirtelyllä prosessivaiheiden välillä ei kuitenkaan saavuteta parasta hyötyä vaan dataa täytyy osata myös käyttää. Datan tehokas käyttö vaatii valutuotantoon sopivan digitaalisen alustan, josta datan saa helposti tarvittaessa haettua, ja jolla edistyneet dataa analysoivat ohjelmat toimivat. Lisäksi data-analyysit tulisi saada muutettua visuaalisesti helposti ymmärrettävään muotoon. Edistyneillä data-analyyseillä voidaan valuteollisuudessa esimerkiksi ennakoida reaaliajassa tulevia tuotannon keskeytyksiä tai valuvirheitä, kun eri analyysien etsitään korrelaatioita syy ja seuraus suhteiden välillä esimerkiksi lämpötiloja, prosessilaitteiden kuntoa ja työkalujen käyttöä seuraamalla.(30)

Digitalitalisoinnin vaatimat rakennemuutokset ovat kuitenkin valimoympäristössä ja valujen valmistusteknisestä luonteesta johtuen erityisen haastavia toteuttaa. Yksittäisiä tuotantoprosesseja on paljonkin onnistuttu digitalisoimaan paikallisesti valimon sisällä ja helpottamaan siten tuotantovaiheiden prosesseja, mutta suurin osa digitaalisuuden tuomista hyödyistä jää yhä käyttämättä juuri siksi, että käytetyt parametrit eivät jää muistiin tai niitä ei voi enää myöhemmin yhdistää tiettyyn valutuotteeseen tai -sarjaan.(16, 27, 28) Toisin sanoen, nykyvalimoiden tuotantovaiheissa käytetty data on suurimmaksi osaksi kertakäyttöistä. Lisäksi jo olemassa olevan valimon konekannan liittäminen digitaaliseen verkkoon voi olla haasteellinen tehtävä toteuttaa. Suuret lämpötilavaihtelut, pöly ja usein hyvinkin rajut valujen jälkikäsittelyvaiheet tekevät yleisimpien sensori- ja seurantateknologioiden hyödyntämisen valimoympäristössä mahdottomaksi toteuttaa, vaikka ne toimisivatkin jollakin toisella toimialalla tehokkaasti. Digitaalisuus valimossa tuo kuitenkin aivan uusia mahdollisuuksia valutuotteen valmistukseen ja elinkaareen, joten keskenään keskustelevien digitaalisten teknologiaratkaisujen löytäminen valimo-olosuhteisiin sopiviksi on todellakin etsimisen arvoista.

Esimerkkejä digitaalisten ratkaisujen hyödyntämisestä valimoiden eri tuotannon prosesseihin löytyy jo maailmalta varsinkin erilaisten RFID eli Radio Frequency Identification -teknologioiden osalta. Esimerkiksi eräs kupari- ja pronssivaluihin erikoistunut valimo tehosti keurnojen valmistustaan ja niiden laatua määrittämällä keurnatykin asetukset automaattisesti aina kulloinkin käytössä olevan keurnalaatikon mukaan. Keurnatykki, keurnojen valmistuksessa käytettävä laite, joka puhalttaa hiekkaa keurnalaatikkoon muodostaen valmiin keurnan, tarvitsee useita eri muuttujaparametreja erilaisille keurnalaatikoille. Parametreja ovat esimerkiksi paine, lämpötila, hiekka- ja sidosainemäärä. Kyseisellä valimolla oli noin 2000 eri parametrien variaatiota erikokoisille ja -muotoisille keurnoille, ja aina uuden keurnalaatikon käytössä täytyi ennen laitteen asetukset säätää uusille keurnoille sopivaksi - mahdollisesti toimintaa täytyi vielä testata ja asetuksia hiottiin tarvittaessa uudelleen. Tästä syystä valimo päätti hankkia RFID valmiudella varustetun keurnatykin, joka lukee automaattisesti keurnalaatikon alle kiinnitetystä etäluettavasta yksilöllisestä RFID-tagista tarvittavat muuttujaparametrit kyseiselle keurnalaatikolle. Koneen asetukset tulevat siis valmiiksi määriteltynä valmistuspaikalle aina valmistettavan tuotteen mukaan ja ne luetaan automaattisesti. Tällä tavoin voitiin varmistaa, että samanlaisten keurnojen valmistuksessa

käytettiin aina samoja asetuksia, joten myös samanlaisten keurnojen ominaisuudet säilyivät aina samanlaisina. Keurnojen valmistuksen tehokkuutta saatiin myös parannettua, kun koneen asetusten määrittelyä ei tarvinnut enää tehdä aina uudelleen keurnalaatikoiden vaihdoissa.(31)

Toisessa esimerkissä eräällä Saksalaisella rautavalimolla oli ongelmia tietää tarkalleen kuinka monta valmista valukappaletta tietystä rautaseoksesta on kulloinkin valmiina ja missä ne tarkalleen ottaen sijaitsivat, jotta voisivat vastata asiakkaiden toimitusaikavaatimuksiin. Ratkaisuna ongelmaan valimo varusti valujen liikuttelussa käyttämänsä trukit RFID-lukijoilla, jotka tunnistavat aina liikuteltavan valuerän ja vaiheen missä kohtaa tuotantoa ne ovat matkalla. Lisäksi trukkeihin lisättiin elektroninen vaaka, jonka mukaan voitiin laskea kuormassa olevien valujen kappalemäärä sekä paikannusjärjestelmä, joka määrittää trukin sijainnin ja orientaation reaaliaikaisesti. Järjestelmän avulla voitiin reaaliaikaisesti määrittää, minne mikäkin valukuorma on milloinkin asetettu ja valukuormiin voitiin aina lisätä lisäinformaatiota esimerkiksi valutuotteiden sen hetkisestä tuotannon tilasta. Valimo saa nyt reaaliajassa tietää pystyykö se vastaamaan asiakkaan toimitusaikoihin vai ei. Lisäksi reaaliaikaisella datalla, jota trukkien liikuttelussa jää talteen, voi valimo nyt optimoida trukkien kunnossapitoa, tarjota tarkempaa tietoa toimitukselle ja jopa ennaltaehkäistä työtaturmia valimossa.(32)



Kuva 2. Automaattinen raskaiden valujen kuljetusvaunu.(10)

Esimerkki yhdenlaisesta digitaalisesta ratkaisusta löytyy myös erästä tarkkuusvalimosta, jossa tuotteiden sisäisessä kuljetuksessa käytettäviin muovisiin kantolaatikoihin lisättiin yksilölliset RFID tagit. Tageihin lisättiin muun muassa valutuotteiden paino, josta voitiin määrittellä kantolaatikossa olevien valutuotteiden kappalemäärä.(33) Lisäksi maailmalta löytyy esimerkkejä vielä kehittyneemmistä sensori- ja seurantamenetelmien soveltamisessa kokonaan automaattisten kuljetusratkaisujen toteutuksen muodossa, kuten kuvassa 2(10).

Digitaalisia ratkaisuja on jo siis onnistuneesti pystytty toteuttamaan erilaisissa valimoympäristöissä erilaisissa käyttötarkoituksissa. Edellä mainittuja digitaalisia ratkaisuja on kuitenkin käytössä vain murto-osassa valimoja, joten lisätyn digitaalisuuden hyötyjä ei ole ehkä täysin ymmärretty, valimoympäristöön soveltuvia digitaalisia ratkaisuja ei ole helposti

saatavilla tai niitä on vaikea soveltaa valimon tuotannossa. Seuraavien valujen simulointiin ja seurantamenetelmiin tarkemmin perehtyvien kappaleiden tarkoituksena on eritellä ja löytää digitaalisia ratkaisuvaihtoehtoja uusimmista tarjolla olevista digitaalisista keinoista ja työvälineistä, joilla lisätä valimoiden tuottavuutta ja tehokkuutta.

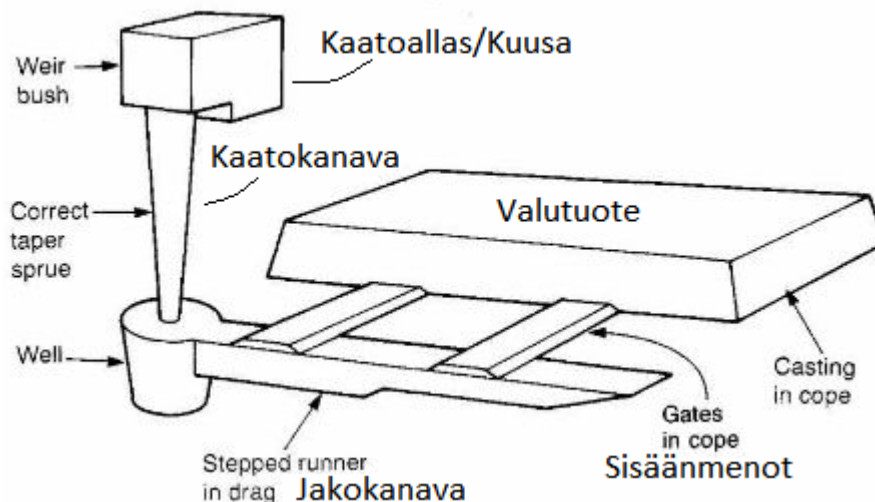
4.1. Valun suunnittelu ja -simulointi valutuotannossa

Valutuotteen suunnittelussa valun suunnittelu jää tavallisesti valimoiden tehtäväksi ja asiakas on vastuussa itse valutuotteen designista. Luonnollisesti valimoilla on valun suunnitteluun paremmat edellytykset pitkän kokemuksen myötä. Tilanne muuttuu, mikäli valimolla on omia tuotteita, jolloin myös valutuotteen suunnitteluvastuu valimossa kasvaa. (16, 27, 28) Valun suunnittelun tavoitteena on hallita valutapahtuma ja tehdä muotin täyttymisestä mahdollisimman rauhallinen ja tasainen, jotta valuvirheinen määrät jäävät minimiin. Lisäksi varmistetaan valutuotteen lopulliset ominaisuudet oikeanlaisilla jälkikäsittelyillä. Valun suunnittelu pitää sisällään valujärjestelmän suunnittelun. Valujärjestelmiin kuuluvat valukanavat ja jähmettymisen aikaiset syöttöjärjestelmät, kuin myös muotit ja niihin liittyvät osat.

Suunnittelu- ja simulointiohjelmat ovat nykyaikaisessa digitaalisessa valun suunnittelussa ratkaisevassa roolissa ja nopeuttavat valutuotteiden tuotantoon pääsyä ilman merkittäviä koevalukustannuksia. Nykyaikaiset valusimulointiohjelmat tarjoavat myös yhä tarkempia prosessiparametreja valutuotantoon ja automaattisia optimointityökaluja tuotannon tehostamiseen. (34) Simuloinnin kannalta seuraava askel digitaalisuuteen painottuvassa kehityksessä voisi olla simuloinnin integroiminen kiinteäksi osaksi valutuotannon ohjausta siten, että kaikki valutuotannon prosessilaitteisiin tarvittavat parametrit siirtyisivät automaattisesti tuotantoon hyväksytystä simulointimallista suoraan prosessilaitteisiin.

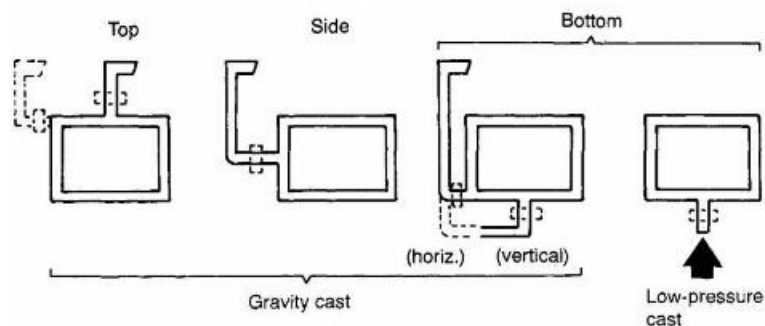
4.1.1. Valun suunnittelun perusteet

Suuri osa valuista valmistetaan yksinkertaisesti kaatamalla sulaa metallia senkasta suoraan muotissa olevaan täyttökanavaan, jolloin painovoiman vaikutuksesta muotti täyttyy. Itse täyttyminen on kuitenkin kaikkea muuta kuin yksinkertainen. Painovoimalla tai matalapaineella toimivista valujärjestelmistä on monia eri variaatioita, mutta suunnittelun lähtökohdat ovat kaikissa samat: Tasainen täyttyminen sekä kuonan ja kaasusulkeumien rajoittaminen valutuotteessa. Kuvassa 3 on eräs hiekkavaluun soveltuva valujärjestelmäesimerkki.



Kuva 3. Esimerkki valujärjestelmästä ja siihen kuuluvista osista.(35)

Suljettavien muottien valujärjestelmän toteuttaminen on aina haasteellista ja tapoja on monia(kuva 4). Usein valujärjestelmä voi olla toimiva pienillä protosarjoilla, mutta varsinaisessa tuotannossa samalla valujärjestelmällä valutuotteessa ilmeneekin suuri määrä hylkäykseen johtavia vikoja. Yleensä vika johtuu tällöin sulan turbulentsista täyttymisestä muotissa, minkä vaikutuksia yksittäisessä valussa on vaikea ennustaa ja johtaa lopputulokseen, jossa osa valuista onnistuu ja osa ei. Hyvässä valujärjestelmässä valukanaviston ja valutuotteen materiaaltarpeen suhde toisiinsa on optimoitu. Valujärjestelmä irrotetaan lopulta valutuotteesta ja kierrätetään uudelleen, joten sen tarvitsema materiaalmäärä on hyvä olla mahdollisimman pieni. Tällöin esimerkiksi samasta sulaerästä saadaan enemmän valuja, mikä parantaa taas valimon tuottavuutta ja taloudellisuutta. Toinen hyvän valujärjestelmän ominaisuus on, että muotin täyttyminen on mahdollisimman rauhallinen ja sulan nopeus on rajoitettu sopivaksi. Kokeellisen datan perusteella on huomattu, että esimerkiksi alumiinivaluihin jää ilmaa loukkuun sulan nopeuden ollessa 0,5 – 1,0 m/s yläpuolella ja sopiva sulan nopeus olisi siis 0,25 – 0,5 m/s välillä. Nopeus vaikuttaa tietysti myös turbulenssin muodostumiseen. Nopeus tulisi rajoittaa mahdollisimman aikaisessa vaiheessa erilaisin kuristuksin ja viimeistään siinä vaiheessa, kun sula saapuu sisäänmenosta valukappaleeseen. Kolmas toimivan valujärjestelmän ominaisuus on, että valutuotteeseen kuulumatoman aineen pääsyä valukappaleeseen rajoitetaan tai estetään kokonaan. Tällaisia aineita ovat esimerkiksi kuona, oksidit, hiekka, ilma ja muut kaasut. Niiden etenemistä valujärjestelmässä rajoitetaan erilaisilla keraamisilla suodattimilla ja valukanaviston geometrisilla muodoilla, joihin ei toivottava aines jää loukkuun. Lisäksi rajoittamalla sulan etenemisnopeutta voidaan estää haitallisten aineiden päätyminen valutuotteeseen, kuten aiemmin jo todettiin. Lopuksi hyvän valujärjestelmän tulisi olla myös helposti irrotettavissa valutuotteesta. Mieluiten yhdellä yksinkertaisella toimenpiteellä, kuten iskulla tai suoralla leikkauksella. Esimerkiksi kaarevan leikkauksen vaativan valukanavan irrotus vie enemmän aikaa ja on hankalampi toteuttaa.(35)

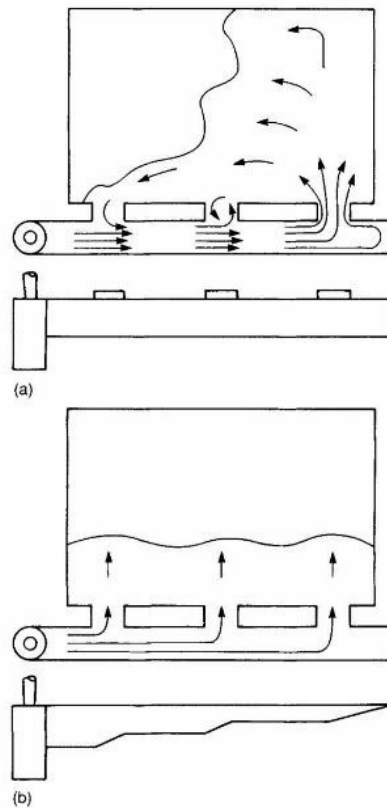


Kuva 4. Erilaisia valujärjestelmän toteutustapoja. Kaatokanaviin merkityt katkoviivat tarkoittavat mahdollisia suodattimien paikkoja. Kuvista on selvyiden vuoksi jätetty valujärjestelmän osia pois ja tällaiseen kaikki painovoimalla toimivat valujärjestelmät olisivat huonoja ratkaisuja liian suorien sisäänmenojen takia.(35)

Valujärjestelmän perusosia hiekkavaluissa ovat kaatoallas, kaatokanava, jakokanava ja sisäänmenot(kuva 3). Kaatoallas voi olla esimerkiksi suppilomainen tai pohjapadollinen. Suppilomainen kaatoallas on yksinkertainen ja taloudellinen toteuttaa sekä mahdollistaa jakokanavan nopean täyttymisen. Suppilomainen kaatoallas toimii hyvin pienillä valutuotteilla. Isoille valukappaleille, joilta vaaditaan parempaa laatua, ei suppiloimaista kaatoallasta suositella, koska toimiakseen se vaatii oikeanlaisen kuristuksen heti kaatokanavan loppuun, jotta kaatokanava pysyy täyttyneenä kaadon aikana. Mikäli kaatokanava ei pysy täyttyneenä kaadon aikana, kulkeutuu ilmaa ja kuonaa jatkuvasti valuu. Lisäksi sulan kaataminen suoraan avonaiseen suppiloon aiheuttaa kuonan ja ilman kulkeutumista valuu muutenkin sulan nopeuden ollessa suuri. Turvallisempi sulan kaataminen tapahtuu esimerkiksi pohjapadollisen kaatoaltaan avulla, kuten kuvassa 3. Tällöin epäsuoran kaadon avulla, jolloin kaataminen ei kohdistu suoraan kaatokanavan suuaukkoon, sulan nopeus on paremmin hallittavissa. Pohjapadollinen ratkaisu estää lisäksi kuonan pääsyä valujärjestelmään ja valutuotteeseen. Samanlaista epäsuoraa kaatoallasta voidaan käyttää myös ilman pohjapatoa, mutta tällöin kuonaa päätyy enemmän valujärjestelmään. Vaikka epäsuoralla kaadolla toimiva kaatoallas mahdollistaa hallitumman täyttymisen, voi näissäkin tapauksissa valutuotteeseen pääsevien ei-toivottujen aineiden määrä helposti kasvaa liian hitaalla sulan kaatamisella. Kaatoallas tulisi täyttyneenä koko kaadon ajan, jotta valujärjestelmä toimisi toivotulla tavalla.(35)

Kaatokanavan suunnittelussa mennään taas usein pieleen ylimitoitetulla suunnittelulla, jolloin esimerkiksi kaatokanavan täyttyminen vie enemmän aikaa ja ilmaa kulkeutuu tällöin enemmän jakokanavaan aiheuttaen sulan turbulenssia ja oksidoitumista. Ylimitoitetussa kaatokanavassa sula putoaa vapaasti ja vie ilmaa mukanaan kaatokanavan pohjaan. Kuuma sula aiheuttaa tällöin iskumaisia rasituksia kaatokanavassa, mikä johtaa muottien rikkoutumisiin ja eroosioon. Sulan syöksymistä jakokanavaan pyritään rajoittamaan erilaisilla kuristuksilla ja esimerkiksi kaatokanavan loppuun lisätään usein ylimenevä laajennusnupikka(kuva 3 engl. well), joka ehkäisee kaadon alun roiskauksen aiheuttamia ongelmia ja lisäksi erottaa kuonaa tai muita valun epäpuhtauksia. Samalla periaatteella myös jakokanavistoon voidaan tehdä pieni ylimeno ennen sisäänmenoa, jolloin valun ensirintama ei syöksy suoraan valuonkaloön ja täyttymisestä saadaan tasaisempi. Mikäli valussa on useampia sisäänmenoja, olisi jakokanavisto syytä tasapainottaa kuten kuvassa 5, jolloin valu-

kappale saadaan täyttymään tasaisena rintamana eikä pyörteitä synny. Muita hyviä suunnittelun lähtökohtia jakokanaviston suunnittelulle on se, että jakokanavat suunnitellaan alamuottiin, jolloin ne täyttyvät ensin ennen sulan etenemistä valuonkaloon. Tämä antaa sulalle hetken enemmän aikaa erotella ilmakuplia ja kuonaa, jotka nousevat jakokanavan yläpintaan eivätkä kulkeudu enää sisäänmenoista valuonkaloon.(35)



Kuva 5. a) Valun epästabiili täyttyminen tasapaksulla jakokanavalla. b) Tasapainotettu täyttyminen porrastetusti kavennetulla jakokanavalla.(35)

Sisäänmenot ovat viimeinen valujärjestelmän osa sulan etenemisessä ennen valuonkaloon saapumista. Sisäänmenot mitoitetaan ja paikoitetaan siten, että sulan virtaus valukappaleeseen saavuttaessa on mahdollisimman tasainen. Perussääntönä onkin, ettei sisäänmenoja sijoiteta heti kaatokanavan välittömään läheisyyteen, josta syöksyvä turbulenttinen sula voisi päätyä heti sisäänmenojen kautta valukappaleeseen. Tavoitteena on myös mahdollisimmat ohut sisäänmeno, jotta valujärjestelmän poistaminen valutuotteesta sulan jäähmettymisen jälkeen olisi mahdollisimman helppoa. Valujärjestelmän eri osien toiminta kaadon aikana perustuu kokonaisuudessaan sulan virtauksen hallintaan sopivalla kuristuksella, jota voidaan säädellä esimerkiksi kaatokanavan, jakokanavan ja sisäänmenojen poikkipinta-alojen erilaisilla suhteilla toisiinsa. Yksi laajasti käytetty valujärjestelmän suhdeluku on esimerkiksi 1:2:2. Sulan jäähmettymisen aikainen tärkein yksittäinen valun onnistumiseen vaikuttava suure on jäähdytymisen moduli eli tilavuuden suhde jäähdyttävään pinta-alaan. Modulien laskeminen on kriittistä erityisesti jäähdytymisen aikaisen kiteytymiskutistuman kompensointiin syötöillä, jotta kutistumasta aiheutuvat imuonkalot saadaan syntymään syöttökupuihin tai syöttävään jakokanavaan eikä itse valukappaleeseen.(35, 36)

Edellä esitetyt valujärjestelmän osat ja valujärjestelmän suunnittelun lähtökohdat koskevat pääasiassa perinteisiä hiekkavaluja, mutta vastaavia sulanhallinnan osia ja valujärjestelmän suunnitteluperusteita käytetään myös kokilli-, matalapaine- ja tarkkuusvaluissa. Paine-, kokilli- ja matalapainevaluissa täytyy ottaa huomioon myös valutapahtuman syklisyys kesto-
muotteja käytettäessä huomioimalla muottien alkulämpötila ja jähmettymiseen vaadittava aika ennen valutuotteen poistoa muotista. Kuten todeta saattaa, valujärjestelmän suunnittelu pitää sisällään useita monimutkaisia sulanhallintaan liittyviä asioita. Kaikkia sulan käyttäytymiseen liittyviä ilmiöitä ei läheskään vielä täysin tunneta ja sulan hallinta on pitkälle kokemukseen perustuvaa. Valujärjestelmän merkitys valutuotteen lopullisen laadun kannalta on kuitenkin erittäin kriittisessä osassa, joten sen toimivuuteen tulee valun suunnittelussa panostaa erityisesti. Kehittyneillä simulointiohjelmilla voidaan valujärjestelmän toimivuus ja muutoksien vaikutus testata nykyään suhteellisen helposti.

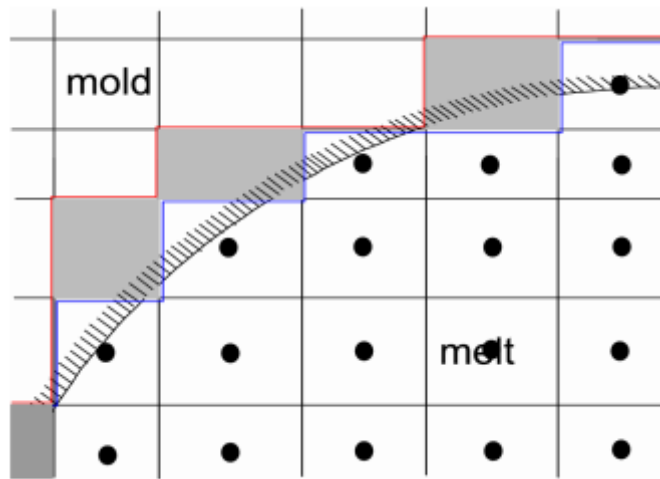
4.1.2. MAGMASOFT -valusimulointi

Valun suunnittelu uusille valutuotteille on ennen perustunut pitkälti valimoiden kokemukseen aikaisemmista suunnitteluprojekteista ja ennen uuden valutuotteen tuotannon aloittamista on voinut olla jo useita koevaluja. Uuden valutuotteen kehittäminen tuotantoon sopivaksi on usein toteutettu niin sanotusti kantapään kautta. Kehittyneet simulointiohjelmat ovat tosin todistaneet luotettavuutensa valun suunnittelussa tehden useat koevalusarjat tarpeettomiksi. Nykyään simulointiohjelmien avulla voidaan valmistella uudet valutuotteet tuotantoon sopiviksi lyhyessä ajassa, ilman merkittäviä kehityskustannuksia tai riskejä. (23, 34) Simulointiohjelmien avulla toteutettu valun suunnittelu tavanomaisimpien valuvirheiden välttämiseksi valutuotannossa on valimoissa yleisesti hyvin omaksuttu. Yhä kehittyneet simulointiohjelmat tosin tarjoavat paljon muitakin ominaisuuksia, joita valimoissa ei niinkään ole otettu vielä hyötykäyttöön. (22, 27)

Eri simulointiohjelmilla suoritettujen valusimulaatioiden avulla varmistetaan yleisesti valujärjestelmien toiminta varmistamalla rauhallinen ja hallittu valun täyttyminen ensin simulaatiomallissa. Lisäksi voidaan helposti huomata valutuotteeseen mahdollisesti syntyvät ongelmakohdat kuten huokoisuus ja materiaalikeskittymät. Valusimulointiohjelmissä on kaupallisesti saatavilla useita erilaisia ja useilla eri ominaisuuksilla. Yksi käytetyimmistä valun suunnittelun simulointiohjelmista valimoissa on MAGMASOFT, josta on hankittuna käyttölisenssi myös tätä diplomityötä varten. Tämän diplomityön yhtenä tavoitteena on testata MAGMASOFT -simulointiohjelman uusinta valuoptimoinnin ominaisuutta ja arvioida sen suorituskykyä valutuotannossa.

Uusin versio *MAGMA*⁵ tarjoaa kattavan ja tehokkaan työkalun metallivalujen laadun varmistukseen, valuprosessin optimointiin ja tuotannon kustannuksien vähentämiseen. Ohjelmalla voidaan ennustaa metallivalutuotteen kokonaislaatua valun täyttymisen, jähmettymisen ja jäähtymisen näkökulmista simulaatiomallin. Samalla voidaan määrittää esimerkiksi jäännösjännitysten, mikrorakenteiden ja muiden ominaisuuksien jakautumista valutuotteessa. Kokonaisuudessaan *MAGMA*⁵ on suunniteltu tukemaan valutuotteen valmistusta kaikissa valmistuksen eri vaiheissa kuten valujärjestelmien, muottien ja muottisarjojen toteutuksessa, sulatuksessa, valutuotteen lämpökäsittelyissä ja puhdistuksessa. (22)

*MAGMA*⁵ -ohjelman toiminta perustuu laskutoimituksiin Navier-Stokesin differentiaaliyhtälöillä. Navier-Stokesin yhtälöillä voidaan sulan metallin liikettä simuloida numeerisesti, jonka *MAGMA*⁵ esittää visuaalisesti käyttäjälle käyttäjän määrittämän simulointitarkkuuden mukaan. Käytännössä suunnitellun valutuotteen 3D CAD-malli verkotetaan ohjelmassa mesh -komennolla automaattisesti pieniin elementtikuutioihin, joiden vuorovaikutuksia toisiinsa ohjelma laskee simuloinnin aikana. Navier-Stokesin yhtälöillä ja Fourier analyysien avulla ohjelmalla voidaan näin tuottaa luotettavia täyttymis- ja jähmettymissimulaatioita. Kuvan 6 leikkauskuvassa näkyy elementtikuutiot muotin ja valun rajapinnassa, jossa valun elementit on merkitty pisteillä. Todellinen muotin pinta näkyy paksumpana elementtien läpi kulkevana viivana ja verkotettu laskennallinen rajapinta on merkitty sinisellä elementtien reunoilla. Luonnollisesti mitä pienemmän verkotuksen käyttäjä valitsee, sitä tarkempia simulointituloksia saadaan aikaiseksi, tosin laskenta-aika kasvaa myös. Huomioitavaa on se, että sulan virtausta käsitellään ohjelmassa tavallisesti laminaarisena virtauksena.(23, 37)



Kuva 6. Poikkileikkaus verkotetun valupinnan ja muotin rajapinnasta perusverkolla ja Solver 5 verkotuksella.(37)

*MAGMA*⁵ pitää sisällään kuitenkin kehittyneemmän Solver 5 laskentatyökalun, joka simuloinneissa ottaa tarkemmin huomioon valun pinnan, ja jonka voi erikseen aktivoida vaativampia simulointeja varten. Kuvassa 6 osaksi muotin ja osaksi valutuotteen jakavia harmaaksi värjättyjä elementtikuutioita kutsutaan leikkaussoluiksi. Solver 5 -työkalu käsittelee näitä muotin ja valun rajapinnan leikkaussoluja tarkemmin käyttämällä leikkaussolujen laskemisessa tilavuuden ja pinnan korjauskertoimia. Kuvaan 7 on eroteltu yksittäinen muotin ja valun rajapinnan leikkaussolu, jossa muotin osuus näkyy harmaana. Tilavuuden korjauskerroin γ_V määritellään sulan tilavuuden suhteesta koko leikkaussolun tilavuuteen kaavan 1 mukaisesti.

$$V_{sula,P} = \gamma_{V,P} V_P \quad (1)$$

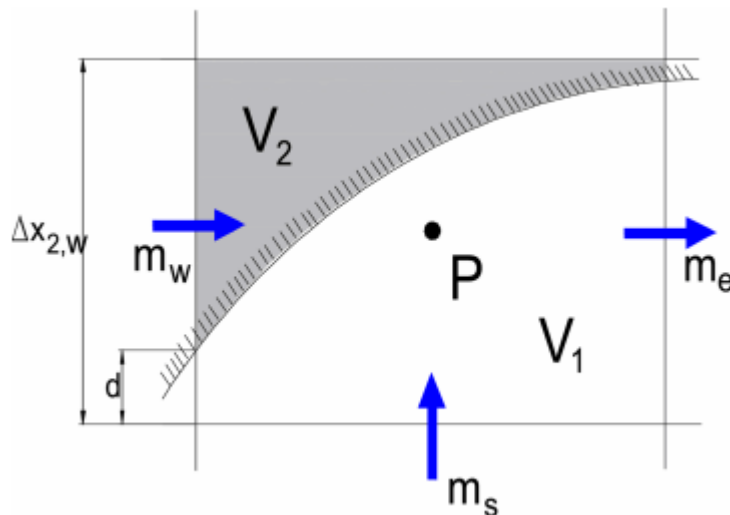
V_P merkkää koko leikkaussolun P tilavuutta(kuva 7) ja $V_{sula,P}$ tarkoittaa sulan tilavuutta tässä solussa.(37)

Pinnan korjauskerroin γ määritellään sulalle vapaana olevasta pinta-alan suhteesta leikkaussolun kokonaispinta-alaan kaavan 2 tavalla.

$$\gamma_w = \frac{d}{\Delta x_{2,w}} \quad (2)$$

Esimerkiksi kuvaan 7 vertaamalla pinnan korjauskerroin γ_w ($w = \text{west side}$) lasketaan sulalle vapaana olevan pituuden d suhteesta koko elementin pituuteen $\Delta x_{2,w}$. Esimerkin kaava 2 on selvyiden vuoksi esitetty pituuksien suhteina 2-ulotteisesti, mutta oikeaan 3-ulotteiseen simulaatioon *MAGMA*⁵ korvaa kaavassa käytetyt pituudet elementin pinta-aloilla.(37)

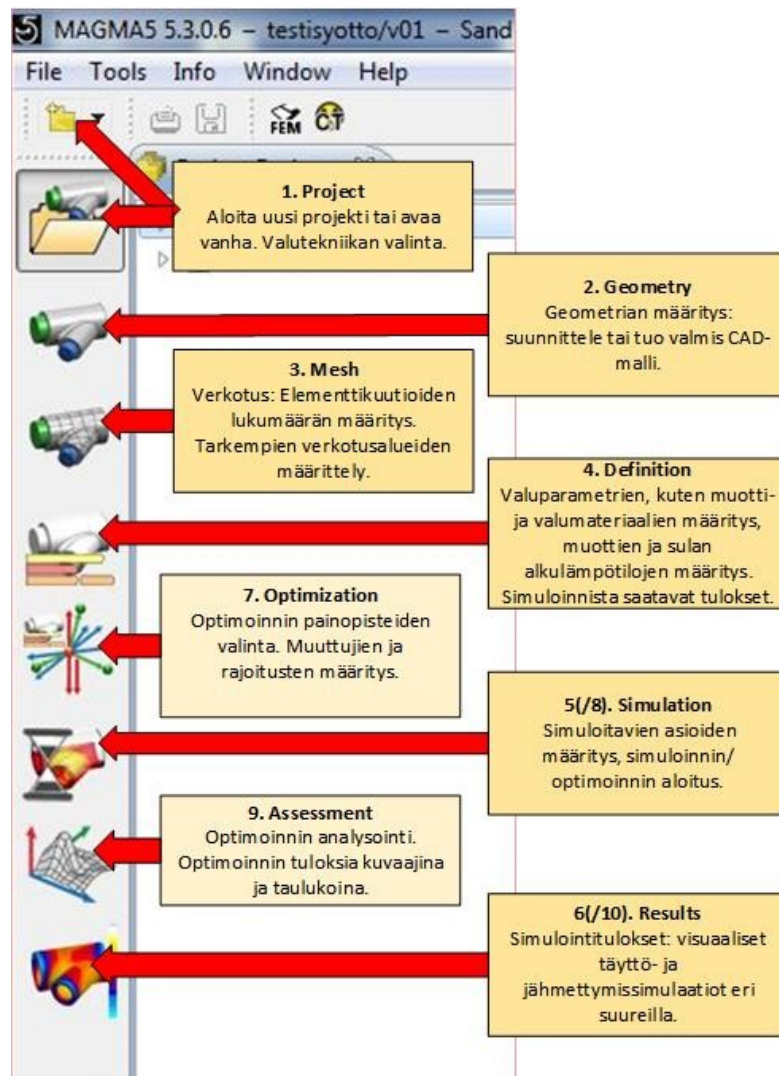
Tarkempaa Solver 5 laskentatyökalua suositellaan käytettäväksi erityisesti kaikissa korkea-painevalusimuloinneissa ja valutuotteissa, joissa on ohuita seinämiä. Turbulenssi ja pintajännitykset valusimulaatioissa otetaan huomioon vain Solver 5 -työkalun aktivoinnin jälkeen. Turbulenssin mallinnuksessa *MAGMA*⁵ käyttää Reynolds -keskiarvotettuja Navier-Stokes yhtälöitä eli niin sanottuja RANS-yhtälöitä(*engl. Reynolds Averaged Navier-Stokes equations*) ja pintajännitysten simulointiin *MAGMA*⁵ tarvitsee pintajännitysvakion. Pintajännitysvakio on materiaaliominaisuus, joita on valmiiksi määriteltä *MAGMA*⁵ -tietokantaan erilaisille materiaaleille.(37)



Kuva 7. Yksittäinen leikkaussoluelementti sulan ja muotin rajapinnasta.(37)

*MAGMA*⁵:n käyttö simulointitarkoituksiin on tehty mahdollisimman yksinkertaiseksi ja suoraviivaiseksi. Käyttäjä etenee ohjelmassa vaihe kerrallaan ja määrittää eri vaiheissa vaadittavat alkutiedot ja rajoitukset kuvan 8 järjestyksen mukaisesti. Jokaisesta vaiheesta avautuu oma näkymänsä ja muutokset tapahtuvat juuri siinä näkymässä, joka kulloinkin on aktiivisena. *MAGMA*⁵ varoittaa automaattisesti, jos jonkin vaiheen määrittämisessä on ongelmia, jotka estävät simuloinnin suorittamisen. Vaiheessa 1, Project -perspektiivissä käyttäjä voi avata uudelleen edellisiä projekteja tai aloittaa kokonaan uuden projektin. Edellisestä projektista voi luoda myös uusia versioita ilman, että kaikkia aiemmin määriteltäjä asetuksia tarvitsee enää uudelleen määrittää. Uutta projektia luodessa ohjelma kysyy valutekniikan, joista käyttäjä valitsee esimerkiksi hiekka-, tarkkuus- tai painevalun. Samalla

kysytään materiaalityyppi eli onko kyseessä esimerkiksi rauta-, teräs- vai alumiinivalu. Toisessa vaiheessa, Geometry -perspektiivissä määritellään valujärjestelmän osien ja valutuotteen geometriat. Geometrioita voidaan luoda *MAGMA*⁵:n omilla suunnittelutyökaluilla, mutta yleensä huomattavasti helpompi tapa on tuoda ohjelmaan valmis kokoonpanomalli, joka on luotu jollain muulla 3D CAD-suunnitteluohjelmalla. Valmiin kokoonpanomallin osia on helppo määrittellä ohjelmassa kuuluvan johonkin tiettyyn kategoriaan, kuten onko kyseessä esimerkiksi muotti vai jakokanava. *MAGMA*⁵ tukee useita CAD-tiedostojen formaatteja, kuten CATIA:n ja ProE:n omia 3D-tiedostomuotoja sekä STEP-, SAT- ja STL -tiedostoja. STL-tiedostomuoto (StereoLithography) eli CAD-mallista luotu kolmioitu geometria on yksi suositeltu ohjelmassa hyvin toimiva tiedostomuoto, joka latautuu myös nopeasti. STL-tiedostomuotoa käyttäessä tulee kuitenkin muistaa, ettei kyseinen tiedostomuoto sisällä pituusyksikköjen dataa vaan tuotujen geometrioiden pituusyksiköt määräytyvät *MAGMA*⁵:ssa kulloinkin käytössä olevien pituusyksiköiden mukaan. STEP-tiedostomuotoa käytettäessä esimerkiksi geometrioiden laatu on ohjelmassa parempi.(37)



Kuva 8. *MAGMA*⁵ v.5.3 -ohjelman näkymä vasemmassa yläkulmassa.

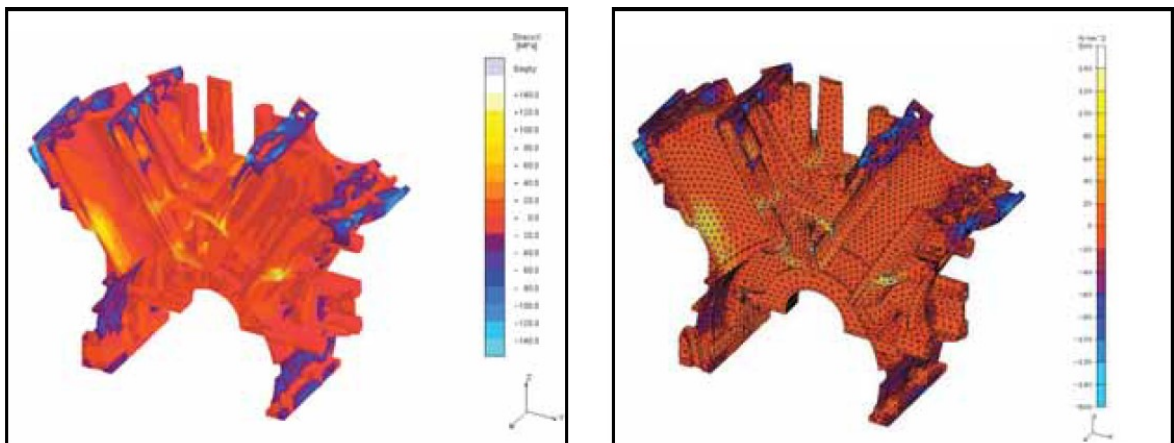
Seuraavassa vaiheessa, kuvan 8 vaiheessa 3, kokoonpanomalli verkotetaan mesh -komentolla Mesh -perspektiivissä, jossa käyttäjä valitsee elementtikuutioiden lukumäärän. Tässä

vaiheessa täytyy myös aktivoida Solver 5 -laskentatyökalu, mikäli haluaa suorittaa tarkemman simulaation. Verkotuksen jälkeen voidaan tarkastella verkotuksen onnistumista, jolloin *MAGMA*⁵ näyttää esimerkiksi onko verkotus liian karkea ohuille seinämille tai onko verkotuksessa ilmakosketuksia. Jos verkotus on sopiva, voidaan edetä seuraavaan vaiheeseen 4, Definition -näkömään, jossa määritellään valuparametrit, kuten muotin, valun ja valujärjestelmien materiaalitiedot. Samalla voidaan määritellä muottien ja sulan alkulämpötilat, syöttöaika valulle sekä jäähtymislämpötila mihin asti simulointia jatketaan. Painevalusimulaatiossa voidaan esimerkiksi vielä määritellä valun valmisteluihin kuluva aika ja valusyklien määrä, jotta tiedetään miten valu onnistuu useilla perättäisillä valukerroilla. Lisäksi Definition -vaiheessa 4 määritellään mitä tuloksia simulaatiosta halutaan tuoda esille ja simulointia voidaan tarkentaa johonkin tiettyyn vaiheeseen valussa. Kaikkea ei tarvitse siis simuloida vaan ainoastaan ne asiat, jotka ovat valun onnistumisen kannalta oleelliset. Kuvan 8 järjestyksessä seuraavana löytyy optimointi, mutta valun optimointia ei voi aloittaa, ennen kuin simulaatio on suoritettu yhden kerran loppuun. Ennen mahdollisen optimointivaiheen suorittamista täytyy edetä ensin Simulation -perspektiiviin eli kuvan 8 vaiheeseen 5 ja aloittaa simuloinnin laskeminen. Kun *MAGMA*⁵ on suorittanut simuloinnin laskennan loppuun, voidaan tuloksia tarkastella Results -perspektiivistä. Results -perspektiivissä voidaan tarkastella valun täyttymistä eri vaiheissa ja eri näkökulmista, kuten sulan nopeuden, lämpötilan ja jähmettymisen näkökulmista.(37) Lisäksi voidaan visuaalisella näkymällä tutkia esimerkiksi simuloinnilla tuotetun valun huokoisuus tai loukkuun jääneen ilman määrää ja niiden sijainteja sekä nopeasti tarkastaa pysyykö valujärjestelmä täyttyneenä täytön aikana. Simuloinnin imuhuokoisuuden- ja Hot Spot -tulosten sekä *MAGMA*⁵:n automaattisen syöttömodulinäyttämän perusteella voidaan esimerkiksi suunnitella valujärjestelmän syötöt optimoiduin modulein.(36)

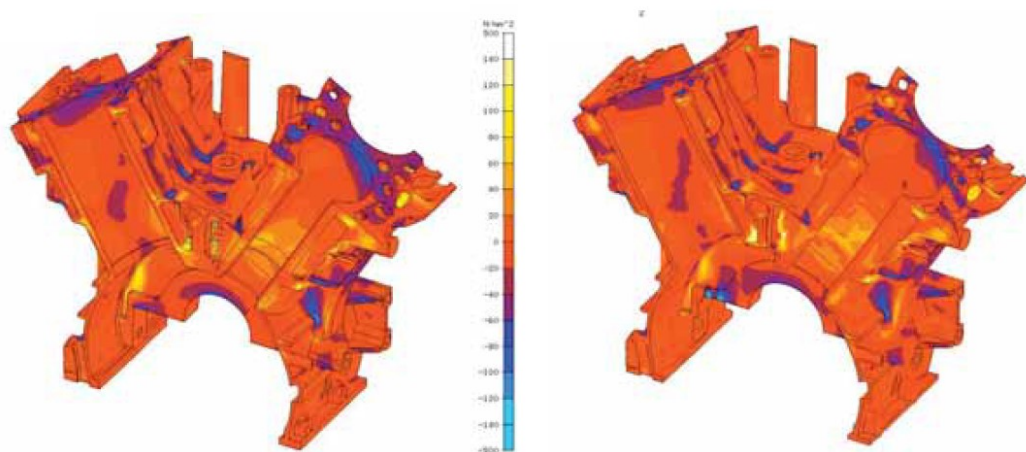
*MAGMA*⁵ -ohjelma on toteutettu modulaarisesti siten, että erilaisiin valutekniikoihin ja valuprosesseihin keskittyneet valimot voivat lisätä *MAGMA*⁵ -ohjelmaan yksilöllisiä tarpeita vastaavia ominaisuuksia erilaisin moduulilaajennuksin. Tämä myös tarkoittaa sitä, ettei tarpeettomista ominaisuuksista tarvitse maksaa. *MAGMA*⁵ -ohjelmaan laajennettavissa olevia materiaaliikohtaisia moduuleita ovat esimerkiksi MAGMAiron, MAGMAsteel ja MAGMAnonferrous. Materiaaliikohtaiset moduulit sisältävät seoskohtaisia materiaalitietoja ja mahdollistavat mikrorakenteiden ja ominaisuuksien ennustamisen. Ohjelmaan linkitettäviä prosessikohtaisia moduuleita ovat esimerkiksi MAGMAhpc, MAGMAipdc, MAGMAinvestmentcasting, MAGMAdisa, MAGMApermanentmold ja MAGMAwheel. Prosessikohtaisilla moduuleilla voidaan hallita eri valutekniikoiden yksilöllisiä prosessiparametreja ja valuprosessia. Moduulien avulla voidaan parantaa valimon tuottavuutta ja valutuotteiden laatua esimerkiksi, kun simuloinnin avulla laaditaan tarkat prosessiparametrit tuotannon prosesseihin. MAGMAcore+mold- ja MAGMAdielife moduuleilla voidaan taas ennustaa valutyökalujen yksityiskohtaisempaa suorituskykyä ja käyttöikää valuprosesseissa, minkä avulla tuottavuutta voidaan edelleen parantaa.(22, 37)

Nykyään monella valmistavan teollisuuden alalla, ennen kuin suunniteltuja osia päästetään käyttökohteeseensa, täytyy osille tehdä monia pakollisia akustisia-, virtaus-, väsymis-, venymä- ja jännityssimulaatioita. Yhä useammin käy kuitenkin niin, että valmistusvaiheessa ilmenee, etteivät simuloidut ominaisuudet vastaa suunniteltuja ominaisuuksia käytännössä. Virheelliset simuloidut tulokset johtuvat yleensä siitä, että suunnitteluvaiheessa ei

oteta huomioon kaikkia osien valmistuksen aikaisia tekijöitä ja simulointitarkastukset tehdään siis alun alkaen väärillä alkuarvoilla. Osa simulointiin tarvittavista tiedoista putoaa matkalla siis pois, mikä johtaa vääriin simulointituloksiin, ja minkä vaikutukset voivat näkyä pitkälle tuotannossa. Suunnitteluvaiheessa tulisi ottaa valmistukseen liittyvät muuttujat tarkemmin huomioon. Esimerkiksi valunsuunnittelussa tiedetään, että valun jäännösjännityksiltä välttyminen on lähes mahdotonta, mutta koneistuksen kannalta valutuotetta käsitellään usein kuitenkin homogeenisena materiaalina, jossa näitä jäännösjännityksiä ei alussa ole. *MAGMA*⁵ -ohjelman moduulien ominaisuudet kuitenkin mahdollistavat näiden jäännösjännitysten simuloinnin ja simuloitujen jännitysarvojen siirtämisen suoraan toisiin CAE-ohjelmiin. Näin rasisuimulaatioihin saadaan alkuarvoina valukappaleen jäännösjännitykset, jotka tulisivat nyt myöhemmissä simuloinneissa otettua huomioon.(23) *MAGMA*⁵ mahdollistaa niin valun jälkeisten jännitysten kuin lämpökäsittelyyn ja koneistukseen liittyvien jännitysten simuloinnin *MAGMA* HT thermal, *MAGMA*stress ja *MAGMA*dielife moduuleilla. *MAGMA*stress moduulin avulla voidaan ennakoida esimerkiksi valutuotteen mahdollinen vääntyminen jähmettymisen aikana. *MAGMALink* moduulin avulla voidaan siirtää *MAGMA*⁵ -jännityssimuloinneista saatuja tuloksia FE-verkotettuina tuloksina suoraan toisiin CAE-ohjelmiin tarkempia rasisuimulointeja varten. *MAGMA*⁵ -ohjelman FE-verkotettuja tuloksia tukevat ainakin seuraavat CAE-ohjelmat: Abaqus, ANSYS, PERMAS, ADINA, LSDYNA, RADIOS, Pam-Crash, FEMFAT, LMS Flancs, I-DEAS, Patran, HyperMesh ja HyperView.(22) Esimerkki jäännösjännitysten huomioimisesta koneistuksessa *MAGMA*⁵ -ohjelman avulla löytyy kuvista 9 - 10 , jossa raudasta valmistettavan FORD V6 moottorilohkon jäännösjännitykset on simuloitu ja muutettu FE-verkotuksen kautta toiseen CAE-ohjelmaan sopivaksi ja simuloitavaksi(23).



Kuva 9. Vasemmalla jäännösjännitysjakauman näkymä *MAGMA*:ssa ja oikealla siitä muunnettu FE-mesh, jossa jännitystiedot säilyvät.(23)

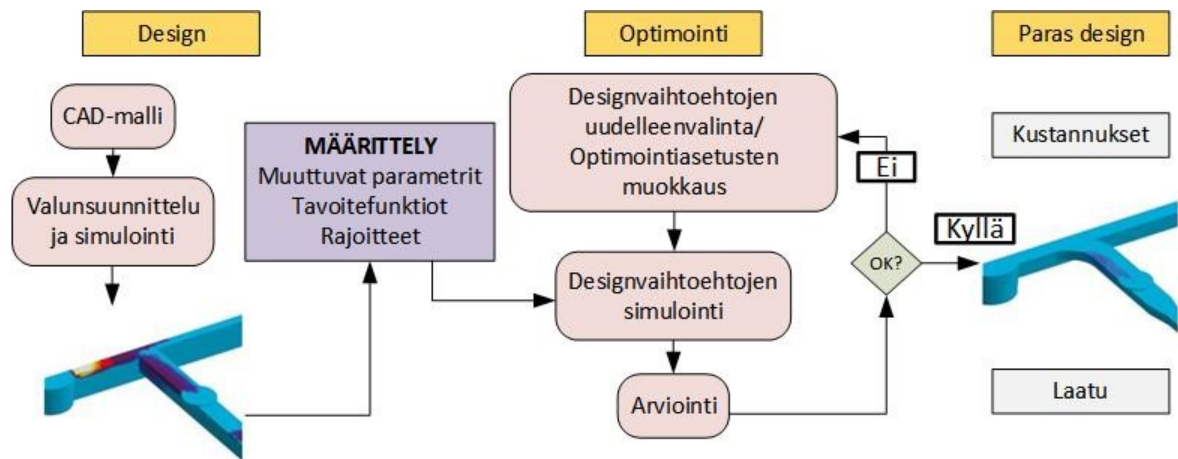


Kuva 10. Vasemmalla jäännösjännitysjaakauma ennen koneistusta ja oikealla jännitykset koneistuksen jälkeen. Tietyissä kriittisissä kohdissa jännitykset eroavat kuvissa toisistaan jopa 20 %.(23)

4.1.3. MAGMASOFT -valuoptimointi

Koventuneen kilpailun ja kiristyvien laatuvaatimusten vuoksi tulee valimoiden kehittää valutuotteitaan yhä paremmiksi perusteellisemman valunsuunnittelun avulla. Valunsuunnittelun ongelmana on, että jokainen valun tuotantoprosessin parametrin muutos vaikuttaa lopulliseen valutuotteen laatuun enemmän tai vähemmän, ja usein vielä samanaikaisesti moniin eri asioihin. Esimerkiksi sulan lämpötilan muutos ei muuta pelkästään sulan viskositeettia vaan voi johtaa esimerkiksi kylmäjuoksuihin valussa tai vaikuttaa sulan oksidointumiseen ja vetyabsorptioon. Jos useiden erilailla vaikuttavien valuparametrien muutoksia analysoidisiin valimoissa systemaattisesti, vaatisi se merkittävän määrän erilaisia kokeiluja ja simulaatioita. Uudet valujen automaattiset optimointimenetelmät on kehitetty vastaamaan juuri näihin valunsuunnittelun moniulotteisiin haasteisiin. Optimointimenetelmillä voidaan valuparametrien välille löytää paras kompromissi pysyen kuitenkin geometria- ja lämpötilarajoitteiden sisällä.(34)

Uusin Magmaversio 5.3 sisältää tehokkaan optimointityökalun simulointitulosten parantamiseen. Optimointityökalu ei muuta itse valutuotteen geometriaa, mutta mahdollistaa valutuotteen paremmat ominaisuudet ja kustannusten alentamisen valuparametreja muokkaamalla, kuten sulan alkulämpötilan, syöttöjen koon ja paikan tai jakokanavien geometrioiden parametreja muokkaamalla.(22)



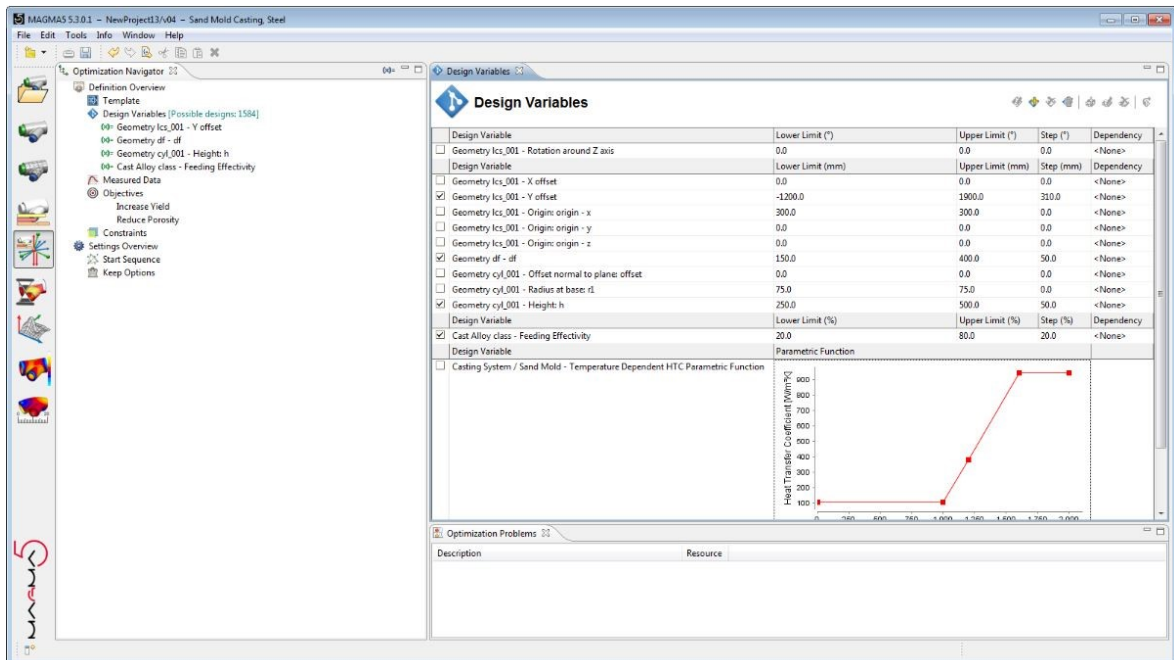
Kuva 11. MAGMA⁵ optimointiproseduuri.(34)

Optimointiproseduuri MAGMA⁵:ssa etenee kuvan 11 järjestyksessä, jossa ensin normaalin simuloinnin jälkeen määritellään optimointiparametrit optimoinnin tavoitteiden mukaan. Tämän jälkeen suoritetaan määrittelyssä muodostuneiden designvaihtoehtojen simulointi ja tulosten arviointi. Optimointisimuloinnin designvaihtoehtojen tulosten arviointi tapahtuu taulukoiden ja kuvaajien avulla, joiden perusteella MAGMA⁵ ehdottaa parhainta vaihtoehtoa.(34)

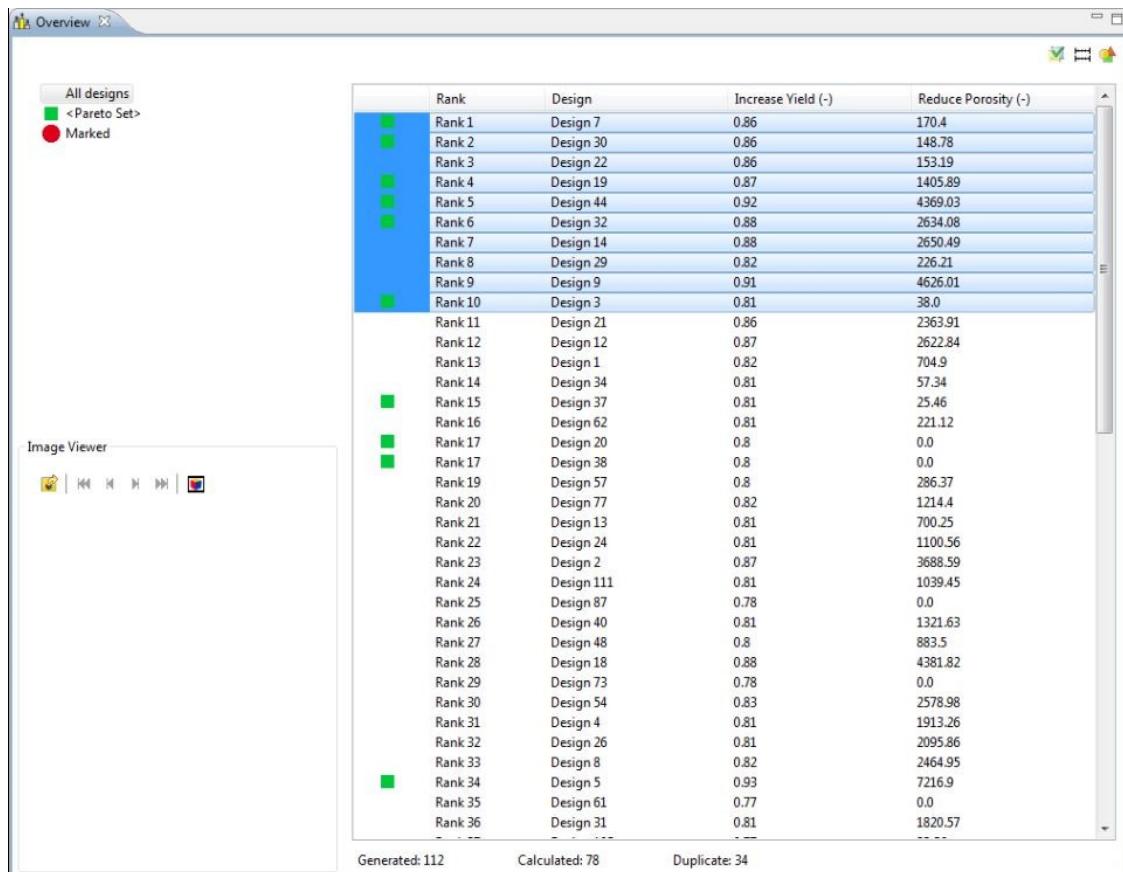
Optimointityökalun avulla voidaan valua kehittää esimerkiksi valutuotteen laadun, kustannusten tai tuottavuuden näkökulmista samanaikaisesti ja tehokkaasti, mutta täysin automaattisin toiminnoin ei ongelmien ratkaisu optimointityökalun avulla tapahdu vaan käyttäjän täytyy tietää optimoinnin vaatimat edellytykset ja tehdä tarvittavat määrittelyt optimoinnille. Lisäksi optimoinnin tuloksia täytyy osata tulkita oikein, koska näennäisesti paras vaihtoehto ei välttämättä kuitenkaan ole aina paras vaihtoehto. Optimointityökalu tarvitsee siis edelleen kokeneen valunsuunnittelijan toimiakseen halutulla tavalla. Jokainen optimoitava designvaihtoehto vaatii täyden simuloinnin ja tyypillinen optimointikierrös sisältää yli sata erilaista laskettua designvaihtoehtoa. Tästä syystä optimoitavaa mallia olisi syytä yksinkertaistaa, jotta laskenta-ajat olisivat lyhempiä. Lisäksi ennen optimoinnin aloitusta täytyy alkuperäinen valusimulaatio olla täysin määritelty ja simulointitulokset saatavilla optimointia varten.(34, 37)

Optimointiasetusten määrittely tapahtuu pääasiassa MAGMA⁵:n Optimization -perspektiivissä eli kuvan 8 vaiheessa 7. Monessa tapauksessa, jotkin optimoinnin vaatimista geometrisista parametreista täytyy kuitenkin määrittellä ja valita Geometry -perspektiivissä. Optimization -perspektiivissä(kuva 12) voidaan määrittellä valmiita optimointimalleja(*engl. Optimization templates*), jotka mahdollistavat optimointitapojen standardoimisen tyypillisille valimon valumenetelmille ja tuotteille, kuten esimerkiksi syötön optimoinnin tietyille materiaaleille tai jakokanavien optimoinnin valujärjestelmiin, joiden yhteyteen on sisällytetty useita valutuotteita. Valmiiksi määriteltyjä optimointimalleja käyttämällä ei kaikkia optimoinnin määrittelyjä tarvitse enää uudelleen asettaa seuraavissa valutuotteiden optimoinneissa. Valmiita optimointimalleja voi käyttää myös useita samalla kertaa.(37)

Optimization -perspektiivissä valitaan ja aktivoidaan valutapahtuman eri muuttujia(*engl. Design variables*), joiden avulla käyttäjä tulee määrittäneeksi parametrit joiden arvot vaihtelevat optimoinnissa. Muuttujia voivat olla esimerkiksi geometriset parametrit, kuten syöttöjen koko ja määrä tai jakokanavat, jotka tosin kaikki määritellään tarkemmin Geometry -perspektiivissä. Muuttujia voivat olla myös prosessiparametrit, kuten sulan kaatolämpötila tai hiekkamuottien purku aika; materiaaliparametrit, kuten valun ja muottien materiaalivaihtoehdot ja alkulämpötilat; lämmönsiirtoparametrit, kuten lämmönsiirtovakiot; tai jälkikäsittelyparametrit, kuten lämpökäsittelyt ja valujärjestelmän irrotusaika. Kaikkiin muuttujiin täytyy käyttäjän kuitenkin määritellä parametrin sallittu muutosväli ja vaihteluväli muutoshaarukan sisällä. Käänteisessä optimoinnissa optimointityökaluun voidaan tuoda myös mitattua dataa, jotka yhdistetään simulointimallin yhteneviin mittapisteisiin. Optimointia varten työkalussa määritellään optimoinnin tavoitteet(*engl. Objective functions*), esimerkiksi jos tavoitteena on vähentää huokoisuutta tai tuottaa mahdollisimman rauhallinen sulan virtaus valun aikana niin valitaan tätä haluttua ominaisuutta vastaava tavoitefunktio. *MAGMA*⁵ sisältää monia valmiiksi määriteltäviä tavoitefunktioita, mutta käyttäjä voi muokata ja lisätä niitä myös itse. Lisäksi optimointityökalussa voidaan määritellä erilaisia rajoitteita(*engl. Constraints*), jos esimerkiksi käytössä on kaksi erilaista muuttujaa, jotka ovat toisistaan riippuvaisia, niin rajoitteiden avulla voidaan estää näiden toiminnan päällekkäisyyksiä. Tällainen tilanne voi tulla vastaan esimerkiksi, jos käytössä on useita vierekkäisiä syöttöjä, niin rajoitteiden avulla voidaan estää näiden koskettaminen toisiinsa. Käyttäjän tulee vielä määritellä optimoinnin aloitussekvenssi, joka määrittää ensimmäisen simulointimallin algoritmiseen optimointiin. *MAGMA*⁵ sisältää automaattisia aloitussekvenssejä generoivia vaihtoehtoja, kuten Full Factorial, Reduced Factorial ja Sobol. Lopuksi käyttäjän tulee vielä määritellä mitkä simulointitulokset säilytetään yksittäisiin simulointeihin koesuunnitelmien ja optimointien sisällä.(37)



Kuva 12. Optimization -perspektiivin näkymä MAGMA:ssa.(37)



Kuva 13. Assessment -perspektiivin Overview -näkymä.(37)

MAGMA⁵ näyttää optimointinäkymässä automaattisesti muodostuvien erilaisten design-vaihtoehtojen lukumäärän aina käyttäjän valitsemien optimointimääritelmien mukaan, mikä antaa suuntaa optimoinnin laskenta-aikoihin. Kun optimoinnin määrittely on saatu valmiiksi, voidaan aloittaa optimoitavien designvaihtoehtojen simulointi Simulation -perspektiivissä, ja kun simuloinnit on suoritettu loppuun, voidaan jatkaa Assessment -perspektiiviin, jossa optimoinnin tuloksia voidaan arvioida samaan tapaan kuin Results -perspektiivissä. Assessment -perspektiivissä voidaan tutkia Optimization -perspektiivissä tehtyjen määritelmien laatua. Assessment -näkymässä optimoinnin designvaihtoehtojen ominaisuuksien tulokset näytetään taulukoina ja kuvaajina, jotka näyttävät visuaalisesti design- ja prosessimuuttujien välisiä korrelaatioita. Assessment -perspektiivissä voidaan muun muassa määrittää optimoinnilla saavutettu parhain designvaihtoehto ja selvittää onko samoilla ominaisuuksilla olevia vaihtoehtoja useampia(kuva 13). Lisäksi voidaan selvittää eri muuttujien vaikutuksia designvaihtoehtojen ominaisuuksiin ja jättää seuraavista optimointikierroksista joitain muuttujia pois mikäli niiden vaikutus optimoinnissa on pieni. Optimoitujen designvaihtoehtojen kuvia ja animaatioita voidaan avata Results -perspektiivissä käyttäjän valinnan mukaan. Results -perspektiivi optimoinnin tapauksessa ei ihan toimi samalla periaatteella kuin normaalissa simuloinnissa ja Results -perspektiivistä saatavat tulokset ovat paljolti riippuvaisia käyttäjän optimointia varten tekemistä määrittelyistä. Assessment -perspektiivissä on myös oma optimoitujen designvaihtoehtojen visuaaliseen tar-

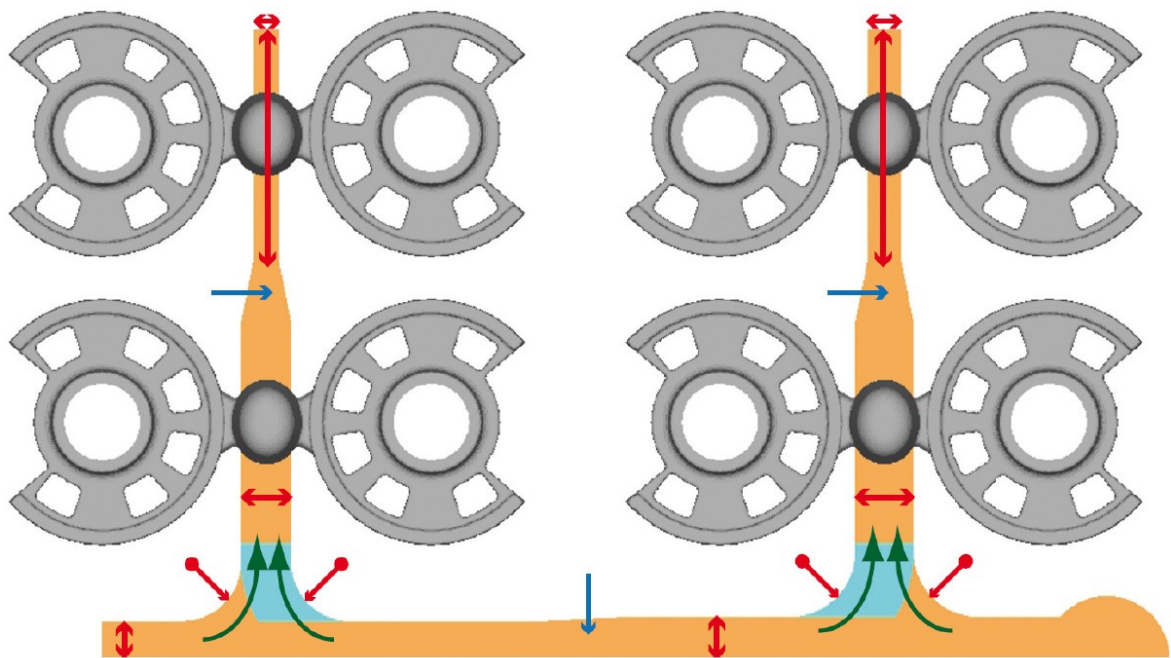
kasteluun tarkoitettu tila, mutta tästäkin tilasta saatavat kuvat ja animaatiot ovat riippuvaisia käyttäjän Definition- ja Results -perspektiiveissä tehdyistä alkuasetuksista. Asetusten oikeellisuus tulisi tarkistaa jo ennen optimointisimulointien aloittamista.(37)

Optimoidun valujärjestelmän esimerkkikuvissa 14 - 15 alumiinilla valettavan hiekkavalujärjestelmän jakokanavisto optimoidaan. Kyseisen valujärjestelmän ongelmana oli ollut valukappaleiden pintaan muodostuvat ilmakuplat, jotka tulivat usein ilmi sinkouksen jälkeen. Ilmakuplien muodostumiseen osaan valujärjestelmän valutuotteisiin oli oletettu johtuvan valujärjestelmän turbulentsista täyttymisestä kaadon aikana, joten täyttymistä optimoitiin tasaisemmaksi jakokanaviin tehdyillä muutoksilla.(34)



Kuva 14. Vasemmalla täyttymisen kannalta huonoin designvaihtoehto, jossa täyttymisero eri valujärjestelmän osissa on yli 5 sekuntia. Oikean puolen design on täyttymisen kannalta lähes optimaalinen.(34)

Kuvassa 14 vasemmalla puolella on hyvin epätasaisesti täyttyvä valujärjestelmä ja oikealla puolella täytyminen on lähes optimaalinen. Täyttymisen kannalta optimaaliseen ratkaisuun ei kuitenkaan esimerkin tapauksessa päädytty, koska päätavoitteena ei ollut valujärjestelmän tasapainoinen täytyminen vaan loukkuun jäävän ilman vähentäminen, joten lopulliseksi kompromissiksi oli valittu designvaihtoehto, jonka valujärjestelmän täyttymisen ero eri valujärjestelmän osissa oli maksissaan 1,5 sekuntia, ja jossa loukkuun jääneen ilman määrä jäi minimaaliseksi. Valittuun designvaihtoehtoon päädyttiin, kun *MAGMA*⁵:n Assessment -perspektiivissä oli vertailtu pistekaavion näyttämää eri optimoinnin designvaihtoehtojen täyttymisajan ja loukkuun jäävän ilman määrän muuttuessa. Julkaisusta poimitun esimerkin optimoinnissa painotettiin, ettei pelkkä jakokanavan muokkaaminen turbulenssin vähentämiseksi ole vielä paras kokonaisratkaisu, mutta kun toiseksi suunnittelukriteeriksi valittiin tasainen täytyminen, saatiin aikaiseksi optimaalinen ratkaisu.(34)



Kuva 15. Valukanaviston muuttujaparametrien valinta *MAGMA*⁵:ssa.(34)

*MAGMA*⁵:ssa valukanaviston muuttujaparametrit esitetyn esimerkin optimointitapauksessa oli valittu kuvan 15 mukaisesti, jossa muuttujaparametreina olivat punaisilla kuvaan merkityt jakokanaviston poikkileikkauksien, pituuksien ja pyörityksien mitat sekä virheillä nuolilla merkityt sulan virtauksen suunnat. Kuvan 15 siniset nuolet indikoivat optimoituun malliin tehtyjä rajoituksia, jotka olivat jakokanaviston osien kiinteitä pituuksia ja niiden paikkoja. Rajoituksilla oli estetty valujärjestelmässä olevien valutuotteiden joutuminen päällekkäin eri jakokanavistojen designvaihtoehdoissa. Lisäksi kiinteinä parametreina oli pidetty valumateriaali, sulan kaatolämpötila, muotin materiaali ja muotin permeabiliteetti.(34)

4.2. Valujen seuranta- ja tunnistusmenetelmät

Täsmällisten valujen ominaisuuksista ja tuotantohistoriasta kertovien tunnistetietojen merkitseminen valuihin on hankala tehtävä toteuttaa. Korkealuokkaisten valutuotteiden tuottamisessa yksityiskohtaista tunnistusta ja seurantaan tukevien merkintätapojen käyttäminen on kuitenkin välttämätöntä, jotta yksittäisten valujen ominaisuudet ja sijainnit voidaan tuotannon prosessien, varastoinnin, logistiikan ja kierrätyksen kannalta tunnistaa suoraan valutuotteesta. Haasteena on erityisesti löytää tehokkaita tapoja jäljittää tuotannon tuote- ja laatuongelmien perimmäisiä syitä valujen tunnisteen perusteella, koska valutunnisteisiin liitettyä tietoa katoaa paljon heti valuihin tehtyjen tuotannon toimenpiteiden jälkeen eikä mahdollisesti kerättyäkään dataa enää voida yhdistää tiettyihin valutuotteisiin.(38)

Informaatiota tuotelaaduista ja tuotantolaitteiden toiminnasta tuotannossa saadaan yhä kasvavissa määrin, mutta informaatiota ei hyödynnetä tehokkaasti, koska tietoa ei ylipäättäen kerätä ja tallenneta analysointiin vaadittavalla tarkkuudella. Valujen tarkkojen tunnistetietojen avulla ja paikantamisella voitaisiin muun muassa estää viallisten tuotteiden päätyminen asiakkaalle ja ennalta ehkäistä tuotannossa tapahtuvia virheitä. Yksilöllisillä tunnistetiedoilla voitaisiin myös paikantaa valutuotteiden sijainnit käyttökohteissaan ilman, että kaikkia saman valuerän tuotteita käyttökohteissaan tarvitsisi tarkastaa, mikäli viallisia tuotteita päätyisi asiakkaalle asti. Näin voidaan välttyä monilta lisäkustannuksilta. Maailmalta löytyy monia esimerkkejä esimerkiksi henkilöautojen valmistajilta, joissa jopa miljoonia autoja on joutunut takaisinvedon kohteeksi niissä ilmenneiden viallisten tuotteiden vuoksi. Tällaisessa tapauksessa, mikäli takaisinvento koskisi viallista valutuotetta, voitaisiin takaisinvento tai korjaavat toimenpiteet kohdentaa vain niihin autoihin joissa viallisia valutuotteita on käytetty valutuottajan tarjoaman yksilöllisten tunnistetietojen avulla.

Tuotannon tasolla valujen yksilöllinen reaaliaikainen seuranta mahdollistaisi tarvittavien korjaavien toimenpiteiden tekemisen heti ongelmien ilmetessä eikä koko valuerää välttämättä jouduttaisi ottamaan varmuuden vuoksi uudelleen käsittelyyn. Tunnistetiedoilla kerätyn datan avulla voitaisiin myös tarvittaessa todentaa, missä vaiheessa mikäkin ongelma on syntynyt ja mikä ongelmia milloinkin aiheutti. Yksilöllisistä valujen tunnistetiedoista voitaisiin todeta, että asiakkaan käyttämät mahdollisesti vialliset valutuotteet eivät ole tietyn valimon valmistamia tai kyseisten valutuotteiden ongelmat eivät ole valutuotteiden valmistuksesta johtuvia, koska ne ovat tunnistetietojen mukaan valmistettu asiakkaan vaatimien parametrien mukaisesti. Näin ollen tarkkoja tunnistetietoja voitaisiin hyödyntää myös juridisessa mielessä. Tunnistus- ja seurantamenetelmiä voitaisiin hyödyntää myös tehokkaasti logistiikan ja varastoinnin sovelluksissa sekä tuoteturvallisuuden näkökulmasta esimerkiksi väärennösten tunnistamisessa. Lisäksi valutuotteen koko elinkaaren kannalta, valusta itsestään löytyvien tunnistetietojen perusteella voitaisiin helposti selvittää esimerkiksi tuotteen kierrätettävyyttä kattavien materiaaliominaisuuksien muodossa, koska tiedot olisivat saatavilla koko tuotteen elinkaaren ajan kiinteästi mukana kulkeutuvan tunnisteen avulla.(38-40)

Valujen merkintätavoista riippuen määräytyvät myös tunnistetietojen käyttötavat tuotannon prosesseissa. Yksinkertaiset merkintätavat, jotka sisältävät vähän tietoa, kuten esimerkiksi vain tuotekohtaisen koodin, rajoittavat tuotteen tunnistuksen tehokasta käyttöä tuotannossa. Tällöin tuotannon toimintoja varten, kuten esimerkiksi tuotantolaitteiden tuotekohtaisten asetusten määrittämisessä ja työvaiheiden raportoinnissa, täytyy tuotekoodi erikseen manuaalisesti lukea ja hakea tuotteen tiedot erillisestä tietokannasta. Tehokkuutta voidaan kasvattaa, jos merkintätapa itsessään mahdollistaisi suuremman tietomäärän sisällyttämisen tuotekohtaiseen tunnistukseen ja merkinnän tietoja voitaisiin jälkikäteen muokata, jolloin tuotteet voivat jo prosessipisteille tullessa sisältää koneiden asetuksia tai tuotteen aiempaa tuotantohistoriaa ja siihen voitaisiin yhä lisätä uutta tietoa. Tällöin tunnistetietojen avulla suoritettavat tuotannon prosessit eivät olisi ainoastaan riippuvaisia tietokannasta löytyvästä datasta, mikä lisäisi tuotantovarmuutta ja tehokkuutta prosessipisteillä. Tehokkuus lisääntyisi myös sitä enemmän mitä enemmän tunnistetietojen lukemi-

nen, asetusten määrittäminen ja uuden tiedon lisääminen tietokantaan ja valutunnistukseen tapahtuisi automaattisin toiminnoin.(39, 41) Automaattinen datan siirtely ja tallennus prosessilaitteiden, valutuotteiden ja tuotannonohjausjärjestelmän välillä mahdollistaa myös reaaliaikaisemman tuoteseurannan ja sitä kautta myös dataa analysoivien sovellusten hyödyntämisen, joilla ohjata tuotannon tapahtumia automaattisesti ja reaaliaikaisesti.

Suomessa valimot tiedostavat hyvin, mitä yksilöllisemmät ja tarkemmat valuntunnistusmenetelmät parhaimmillaan mahdollistaisivat. Merkintätapoja, jotka säilyttäisivät valun tunnisteen koko valutuotteen elinkaaren ajan, ei kuitenkaan vielä ole laajemmin käytössä.(16, 27, 28)

4.2.1. Nykyiset menetelmät

Tilausta tai valuerää indikoivien numerokoodien käyttö yhdessä valuajankohdasta kertovan merkinnän kanssa on yksi yleinen merkintätapa valuissa. Kyseinen merkintätavan avulla voidaan valueriä yleensä jäljittää tiettyyn sulaeraan, mutta valun muista ominaisuuksista kertovat tiedot ja tuotekohtainen tuotantohistoria valuparametreineen on vaikeampi jäljittää pelkän numerokoodin ja siihen liitettyjen tietojen avulla. Tavallisesti kiinteinä kohokuvioina toteutetut merkinnät valutuotteiden pinnassa voivat valujen jälkikäsitelyissä kulu pois näkyvistä tai ne eivät alun perinkään muodostu täydellisesti valutuotteiden pintaan valussa. Merkintöinä voidaan käyttää myös erillisiä jälkikäteen kiinnitettäviä merkintälevyjä. Kiinteiden merkintäkoodien avulla toteutetun tunnistuksen ongelmana on, että sama tunniste on yleensä käytössä koko valuerälle, joten valukohtaisen tuotantohistorian kerääminen talteen tuotannossa ei ole edes mahdollista. Uuden erilaisen merkinnän toteuttaminen uuteen valueräänkin on yleensä vaivalloista ja aikaa vievää. Valukohtaiseen tunnistukseen täytyisi merkintäkoodien olla yksilöllisiä, mutta koska tunnistusmerkinnät muodostuvat yleensä valun aikana muotissa tai muottityökalussa olevan merkinnän negatiivista, pitäisi myös muottien olla yksilöllisiä merkintöjen suhteen. Toinen erillinen ongelma on kokoluokaltaan pienemmät valut, joissa minkäänlaisten kiinteiden merkintöjen käyttäminen on yleensä mahdotonta tilanpuutteen vuoksi. Pienten kokoluokkien valuissa ei siis yleensä käytetä mitään merkintöjä vaan tuotannon prosesseissa niitä liikutellaan useita kappaleita samassa kuljetusastiassa ja yhteisen tunnisteen alla. Pienten kokoluokkien valujen päätyessä jatkotoimenpiteisiin, kuten kokoonpanoon, on käytännössä mahdoton enää tietää mistä valuerästä yksittäinen valu on lähtöisin. Sama koskee myös suurempien kokoluokkien valuja, joista merkinnät on joko koneistettu kokonaan pois tai ne ovat kuluneet tunnistamattomiksi jälkikäsitelyissä.(16, 27, 28, 39)

Valimon sisällä ja tuotannon prosessipisteiden välillä valuja tai esimerkiksi keernoja liikutellaan usein erilaisin ja erikokoisin kuljetuslavooin. Kuljetuslavojen paikantamiseen ja niiden tunnistamiseen käytetään yleensä lavoissa itsessään olevia merkintöjä. Merkintöinä käytetään esimerkiksi numerokoodia, viivakoodia tai lavan mukana kulkeutuvaa valmistuskorttia tai vastaavaa. Lavoissa olevat merkinnät kertovat yleensä niissä kuljetettavien tuotteiden tunnisteen ja niiden lukumäärän. Valuissa itsessään olevia merkintöjä ei välttämättä tarvitse käyttää ollenkaan, koska prosesseihin tai raportointiin tarvittavat tiedot löytyvät jo

kuljetuslavoista, mutta yleensä prosessitiedot jäävät samasta syystä pois myös valujen yksilöllisistä tunnistetiedoista.(16, 27, 28)

Useilla valutekniikoilla yleiset valujen hylkäyksiin johtavat syyt ovat jollakin tavalla yhteydessä viallisiin muotteihin tai keernoihin. Valuvirheet kertamuottimenetelmissä voivat johtua esimerkiksi valun aikana rikkoutuneesta muotista tai jo muotin valmistuksessa syntyneestä viasta muotissa tai keernassa. Mikäli valuvirheet tuotteiden osalta ovat tällaisissa tapauksissa toistuvia, niin kertamuotti- kuin kestromuottimenetelmissä, voivat syyt löytyä viallisesta muottityökalusta tai muotista, vääristä muottien valmistusparametreista tai muutoksesta muottimateriaalien ominaisuuksissa. Tästä syystä myös muoteissa, keernoissa ja muottityökaluissa voisi käyttää erillisiä tunnistusmenetelmiä viallisten valujen yhdistämiseksi käytettyihin mahdollisesti viallisiin valujärjestelmien osiin.

Kestomuottimenetelmissä ja kertamuottien valutyökaluissa yksilölliset tunnistusmenetelmät ovat yleisesti käytössä, mutta kertamuotteihin ja keernoihin ei yleensä enää erillistä tunnistusta käytetä. Kestomuoteissa ja kertamuottien valutyökaluissa käytettävät tunnistusmerkinnät ovat tavallisesti yksilöllisiä stanssattuja numerokoodoja, joita käytetään valutuotteen ja asiakkaan tunnistamiseen. Lisäksi tietoja käytetään myös paikannuksen apuna esimerkiksi varastoinnissa, jotta tiedetään tunnistaiden avulla mihin kyseinen muotti tai muottityökalu on varastoitu. Kertamuottien ja keernojen merkitseminen erikseen voisi tuoda lisäarvoa valuvirheiden perimmäisten syiden paikannukseen tai muun tarkemman prosessihistorian tulkitsemiseen ja analysointiin, mutta muottien ja keernojen purkamisesta johtuva merkintöjen väliaikaisuus toisi yleensä vain merkittäviä lisäkustannuksia valutuotantoon, koska yksinkertaisia ja toimivia merkintätapoja ei kertamuotteja varten ole tai niiden seuraaminen ei ylipäätään ole kannattavaa.

Viallisesta kertamuotista tai keernasta aiheutuva valuvirhe on yleensä johdettavissa vialliseen muottityökaluun, käsittelyvirheeseen tai käytettyihin prosessiparametreihin kertamuottien ja keernojen valmistuksessa. Dataa keräämällä voisi muottien ja muottityökalujen tunnistukseen kuitenkin edelleen tuoda tarkempaa tietoa niiden yksilöllisistä ominaisuuksista ja käyttöhistoriasta tuotannon analysointia varten. Lisäksi muottien ja valutyökalujen tunnistaisiin voitaisiin lisätä tuotekohtaisia prosessiparametrien tietoja, kuten muottien esilämpötiloja tai muita valuparametreja tuotannon tehostamiseksi. Toisin sanoen prosessilaitteiden kanssa keskustelevien älykkäiden valujen lisäksi voisi olla myös älykkäitä muotteja ja muottityökaluja.(16, 27, 28, 39)

4.2.2. Viivakoodi- ja 2D-kuviokooditeknologiat

Valettujen tai stanssattujen numerokoodien lisäksi valujen tunnistamisen mahdollistavia merkintätapoja ovat valuihin liitettävät viivakoodit(kuva 16). Viivakoodien etuna on niiden käytön nopeus automaattisten elektronisten lukijoiden avulla, joilla viivakoodin sisältö voidaan nopeasti purkaa. Perinteisiä viivakoodoja käytetään jo valimoissa monissa eri tarkoituksissa, kuten kuljetuslavojen ja valmistuskorttien tiedonhaussa, mutta suoraan valutuotteiden pinnassa valujen tunnistamistarkoituksessa niitä harvemmin käytetään. Viivakoodin käyttöä valun tunnistena rajoittaa sen rajallinen informaation tallennuskapasiteetti ja merkinnän vaatima koko. Viivakoodeihin informaatio tallentuu lineaarisesti eri paksuisten

mustien ja valkoisten viivojen ketjuna, ja suurempi tietomäärä vaatisi pidempiä viivakoodoja. Käytännössä perinteinen viivakoodimerkintä valussa ei siis voisi sisältää paljoa enemmän informaatiota kuin tavallinen numerokoodimerkintäkään valussa, mutta elektroniset lukulaitteet mahdollistaisivat nopeamman tietojen lukemisen ja hakemisen viivakoodilta.



Kuva 16. Erillinen metallinen viivakoodilaatta valutuotteessa.(42)

Suurin ongelma viivakoodimerkinnän käytössä on kuitenkin ehkä merkinnän käytännön toteuttamisessa. Viivakoodoja voitaisiin helposti ja edullisesti kiinnittää valujen pintaan esimerkiksi tarroina, mutta kyseinen kiinnitysratkaisu ei ole ollenkaan toimiva valimoympäristössä. Pöly, lika, suuret lämpötilat ja karkeat käsittelyvaiheet estävät tarrojen kiinnittymisen tai irrottaisivat niitä eri vaiheissa tuotannon prosesseja. Tarrat voisivat myös likaantua tai repeytyä helposti lukukelvottomiksi. Jotta viivakoodimerkintä valussa voisi toimia läpi tuotannon prosessien, täytyisi se vähintään kaivertaa valun pintaan esimerkiksi koneistamalla tai laserilla. Metalliin kaiverretun koneluettavan viivakoodimerkinnän riskinä olisi edelleen, että yksikin kolhu merkintään voisi tehdä sen lukukelvottomaksi. Merkinnän lukemista haittaisi myös merkinnän mahdollinen hapettuminen, lian kertyminen tai metallin kiiltävyys optisia lukulaitteita käytettäessä. Lisäksi viivakoodit peittyisivät lukukelvottomiksi, jos valutuotteet esimerkiksi pinnoitetaan.

Viivakoodoja kehittyneempien 2D-kuviokoodien(*engl. 2D barcode/data matrix*) käyttö on lisääntynyt huomattavasti erilaisten tuotteiden tunnistus- ja seurantasovelluksissa sekä varsinkin älypuhelimille tarkoitettujen toimintojen suorittamisessa. Toimintaperiaate on viivakoodiin verrattuna samankaltainen, mutta 2D-kuviokoodeihin informaatiota voidaan tallentaa matriisimuotoiseen merkkiin sekä pysty- että vaakasuunnassa, mikä mahdollistaa suuremman datamäärän tallentamisen pienempään kuvioon. 2D-kuviokoodista on monia eri variaatioita ja niistä tunnetuimpia ovat ehkä QR- eli Quick Response -koodi(kuvat 17-18) ja varsinkin autoteollisuuden suosima DataMatrix -koodi(kuvat 19-22). Kaikille 2D-kuviokoodille yhteistä on, että merkit sisältävät jonkinlaisia merkin orientaatiota indikoivia kuvioita, jotta kuviossa oleva informaatio voidaan jollakin optisella menetelmällä tulkita ja lukea oikein. Itse informaatio tallentuu kuvion sisällä oleviin mustien ja valkoisten datapikseleiden yhdistelmiin vähän niin kuin perinteisissä viivakoodissa, mutta siis pikseleinä eikä viivoina.(41, 43) Taulukosta 5 löytyy lueteltuna muutamien erilaisten 2D-kuviokoodien ominaisuuksia.

Taulukko 5. Erilaisten 2D-kuviokoodien ominaisuuksia.(43)

		QR Code	PDF417	DataMatrix	Maxi Code
Developer		DENSO (Japan)	Symbol Technologies (USA)	RVSI Acuity CiMatrix (USA)	UPS (USA)
Memory Capacity [characters]	Numeric	7089	2710	3116	138
	Alphanumeric	4296	1850	2355	93
	Binary	2953	1018	1556	
	Kanji	1817	554	778	
Major features		Large capacity, small printout size, high speed scan	Large capacity	Small printout size	High speed scan
Standards		AIM International, JIS, ISO	AIM International, ISO	AIM International, ISO	AIM International, ISO

Merkittävin viivakoodien ja 2D-kuviokoodien välinen ero, joka mahdollistaisi 2D-kuviokoodien hyödyntämisen myös valimoympäristössä, on tiettyjen 2D-kuviokoodien ominaisuus säilyä luettavissa vaikka osa merkin kuviosta vioittuisi. Kuvioissa on siis lisäominaisuus, jolla vioittuneiden kuvion osien sisältämää tietoa saadaan palautettua, joten 2D-kuviokoodien käyttäminen olisi luotettavampaa kuin perinteisten viivakoodien käyttäminen valutuotteiden tunnisteina. Esimerkiksi QR-koodeille tämä vioittumisen korjausaste on valittavissa 7 – 30 % prosentien väliltä. Tämä tarkoittaa sitä, että parhaimmillaan jopa 30 % QR-koodin kuviosta voi vahingoittua tai olla peitossa, mutta kuvion sisältämä informaation tulisi silti olla luettavissa. Autoteollisuuden yleisesti käyttämä DataMatrix -koodin ECC 200 versio sisältää vastaavan virhekorjausominaisuuden ja on siksi autoteollisuuden yleisesti käyttämä. Lisäksi DataMatrix -koodin ECC 200 versiollinen kuviokoodi tarvitsee merkintätapana suhteellisen pienen tilan, joten sen liittäminen hankalan muotoisiin ja kokoisiin kappaleisiin onnistuu myös. 2D-kuviokodeihin tallennettavan tiedon määrä on yleisesti riippuvainen kuvion koosta, tallennettavan tiedon tyypistä ja koodaustavasta. Taulukosta 5 voikin todeta, että esimerkiksi numeroita voi tallentaa 2D-kuviokodeihin huomattavasti enemmän kuin kirjaimia. On myös huomattu, että 2D-kuviokoodien lukutarkkuus tai lukemisen nopeus heikentyy, mitä enemmän tietoa tallennetaan kuviokoodiin.(40, 41, 43)

4.2.2.1. Valutuotteen suorat merkintätavat

2D-kuviokoodien muodostaminen suoraan metallisten valutuotteiden pintaan onnistuu viivakoodien tapaan esimerkiksi printatuilla tarroilla, mutta kuten aiemmin todettiin, tarroilla kiinnitettävät tunnisteet eivät ole käytännössä kovin toimivia valimoympäristössä. Autoteollisuudessa 2D-kuviokodeja on esimerkiksi merkitty laserilla metallikappaleiden pintaan, jolloin 8 mm x 8 mm kokoiseen DataMatrix -koodiin on liitetty tuotteen syntyhistoria sarjanumeroineen ja päiväyksineen tuotteen prosessidatan keräämiseksi automaattisilla kameralukijoilla tulevaisuuden koneistuksen prosesseissa. Prosessien jälkeen tuotteeseen on voitu laseroida toinen DataMatrix -koodi, joka sisältää päiväyksen ja sarjanumeron lisäksi joitain tuotteen käyttökohteen tietoja, kuten esimerkiksi tuotteen tarvitsemien laakereiden arvoja kokoonpanoa varten. Laseroitujen DataMatrix -koodien käytöllä ei ole kuitenkaan saavutettu merkittäviä hyötyjä kaikissa autoteollisuuden vastaavissa sovelluskohteissa, koska

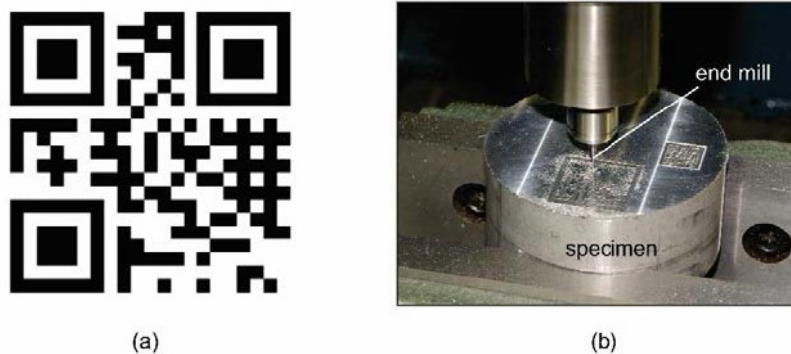
merkinnän sijoittaminen niin, etteivät karkeat käsittelyvaiheet koneistuksessa tuhoaisi DataMatrix -merkintöjä on hankalaa. Lisäksi yhtenä suurimmista haasteista on sijoittaa automaattisia koodeja lukevia kameroita niin, että merkinnät tulisivat aina luetuksi erilaisista tuotteista, koska vielä merkin asennon lisäksi merkintöjen luettavuuteen vaikuttavat suuresti erilaiset valaistusolosuhteet, merkkeihin jäänyt lika tai merkin pinnalla oleva kosteus. Toisin sanoen kaikki merkin kontrastiin vaikuttavat asiat vaikuttavat myös luettavuuteen, koska 2D-kuviokoodeja luetaan optisilla kameramenetelmillä.(41) Lasermerkintätekniikoita on olemassa kymmenkunta erilaista, joilla tuotettujen merkintöjen laatu ja kestävyys ovat hieman toisistaan poikkeavia. Erilaisia lasertekniikoita ominaisuuksineen on listattu taulukkoon 6.(44)

Taulukko 6. Erilaisten lasermerkintätekniikoiden vertailua.(44)

Laser Marking Process Comparison						
Marking Process	Attributes					
	Laser Type	Mark Power	Marking Speed	Marking Quality	Mark Durability	Removes Part Material
Laser Bonding	CO ₂ , LVO4 and Nd:YAG	Low	Slow	Excellent	Good	No
Laser Coloration	Nd:YAG	Low	Slow	Excellent	Excellent	No
LENS	Nd:YAG					No
Laser Etching – Direct	Nd:YAG	Medium	Fast	Very Good	Excellent	Yes
Laser Etching – Coat and Mark	CO ₂ , LVO4 and Nd:YAG	Low	Two-step process	Excellent	As durable as coating	No
Laser Engraving – Direct	Nd:YAG	Medium	Fast	Good	Excellent	Yes
Laser Engraving – Coat and Mark	Nd:YAG	Low	Two-step process	Excellent	As durable as coating	No
LISI	Nd:YAG	High	Slow	Good	Excellent	No*
Gas-assisted Laser Etch	LVO4 and Nd:YAG	Low	Slow	Very Good	Good	Minimal
LIVD	LVO4 and Nd:YAG	Low	Slow	Excellent	Good	No
Laser Shot-Peening	Nd:glass	High	Fast	Good	Excellent	No

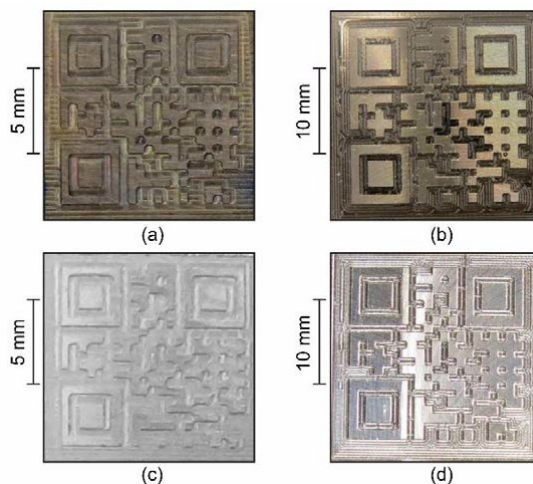
*Marked surface area has improved properties

Laserilla merkitseminen voi helposti mennä pieleen, jos laseroinnin parametrit on asetettu väärin laseroitavalle materiaalille. Yksi yleinen syy merkintävikoihin on lasermerkinnöissä syntyvien reunojen liika palaminen ja sitä myötä merkintöjen terävyyden katoaminen, mikä taas vaikeuttaa merkintöjen lukemista. Tästä syystä 2D-kuviokoodien koneistusmahdollisuutta on brasilialaisessa tutkimuksessa myös testattu vaihtoehtona lasermerkinnöille. Tutkimuksessa testaus suoritettiin erikoisvalmisteisella mikrojrjysimellä.(40)



Kuva 17. a) Koneistettava alkuperäinen QR-koodi. b) Mikrojrysin QR-koodin muodostamiseksi.(40)

Brasilialaisessa tutkimuksessa koneistettiin kuvan 17 a mukainen QR-koodi kahdessa eri koossa valituille materiaaleille, joita olivat messinki ja alumiini. Koneistuksen tulokset ovat näkyvissä kuvassa 18. QR-koodin virheenkorjaustasona oli käytetty 7 %. Tutkimustuloksista ilmeni, etteivät koneistetut QR-koodit olleet luettavissa sellaisinaan standardi QR-lukijoilla. Ongelmana oli kuvioiden reunojen saaminen näkyviin siten, että QR-lukijat erottaisivat ne, koska valaistuserot kiiltävän metallin pinnalla vaihtelivat suuresti kohdasta riippuen. Yhtenä ratkaisuna ongelmaan oli esitetty 3D-skannerin käyttöä QR-koodien lukemiseen, jolloin QR-koodi muodostettaisiin näkyvämmäksi merkintöjen syvyyserojen mukaan. Toisena vaihtoehtona oli kokeiltu koneistetun merkinnän kuvaamista ja sen algoritmein suoritettua kuvankäsittelyä paremman kontrastin aikaansaamiseksi.(40)



Kuva 18. Koneistetut QR-kodinäytteet eri materiaaleille: a) messinki 12,5 x 12,5 mm, b) messinki 25 x 25 mm, c) alumiini 12,5 x 12,5 mm, d) alumiini 25 x 25 mm.(40)

Automaattisella kuvankäsittelyllä saadut tulokset testatulle koneistetulle QR-koodille olivat hyvin lupaavia. Koneistettujen QR-koodien lukeminen onnistuisi siis kehittämällä QR-lukijoita tulkitsemaan myös koneistettuja merkintöjä. Tutkimuksessa oli vielä painotettu, että purseista vapaan koneistetun pinnan luominen on haasteellista, ja että koneistuksen ratajäljet tulisi saada mahdollisimman hyvin pois näkyvistä.(40)

Valmiita kaupallisia ratkaisuja DataMatrix -kuviokoodien tuottamiseksi metallipinnoille löytyy myös erilaisista pistemäisistä iskutyökaluista(engl. *Dot Peen Technology*). Pistemäisissä iskutyökaluissa on yleensä yksi kova pyöreäkärkinen terä, joka iskee materiaalin pintaan

pistemäisiä jälkiä, kuten kuvassa 19. Iskutyökaluilla merkitseminen on tehokasta, tuotetun kuvion jälki on tarkkaa ja 2D-kuviokoodimerkintöjen luettavuus on yleisesti hyvä. Lasertekniikoihin verrattuna ovat iskutyökalut myös huomattavasti edullisempia hankkia. Kaupallisesti on saatavilla myös käsin pideltäviä ja käytettäviä iskutyökaluja. Joissakin tapauksissa iskutyökalun tuottamaa jälkeä pidetään laseria huomattavasti parempana merkintätapana, koska merkintätavan tuottama jälki ei sisällä teräviä reunoja, jotka voisivat toimia jännityskeskittyminä suurissa rasitusolosuhteissa eikä merkintätapa myöskään muuta materiaalin ominaisuuksia kuten lasertekniikat. Lasertekniikoilla voidaan tuottaa tosin paremman kontrastin omaavia 2D-kuviokoodia, joiden lukeminen on helpompaa kuin iskutyökaluilla tuotetun merkinnän.(45) Epätasaisessa pinnassa iskutyökalun tuottama jälki voisi kuitenkin erottua paremmin kuin laserilla tuotettu merkintä, joten iskutyökalun merkintä toimisi ehkä laseria paremmin jälkikäsittelymättömien valutuotteiden pinnoilla. Syväälle materiaaliin ulottuva iskutyökalun merkintä voisi säilyä hyvin ehjänä myös jälkikäsittelyssä.



Kuva 19. Pistemäisen iskutyökalun tuottamia DataMatrix -koodeja metallipinnoilla.(45, 46)

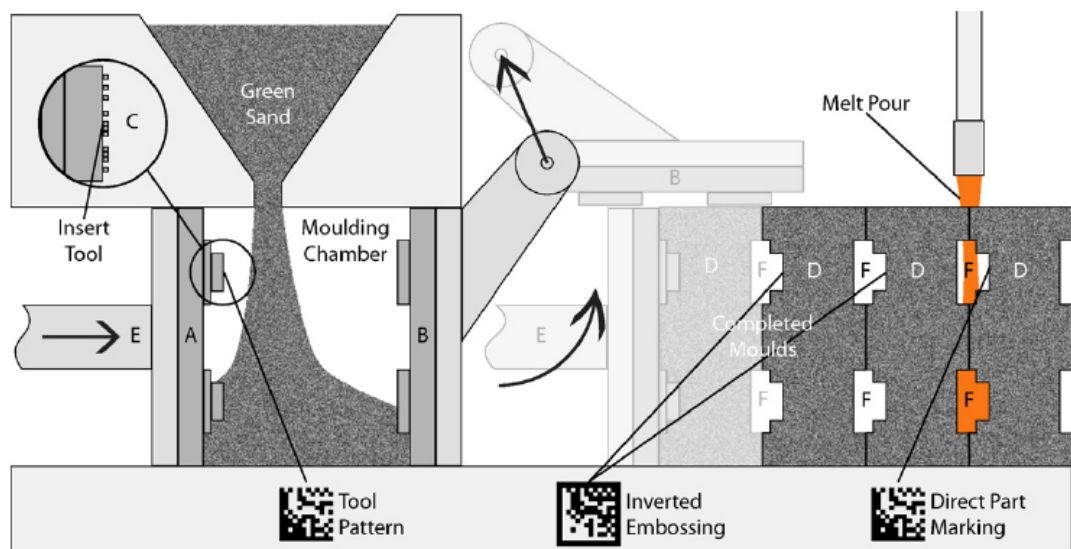
4.2.2.2. Valutuotteen epäsuorat merkintätavat

Valutuotteen yksilöllisen seurannan kannalta, täytyisi valutuotteessa käytetyn tunnistemerkin olla valutuotteessa mahdollisimman aikaisessa tuotannon vaiheessa, jotta valutuotteeseen linkitettävää prosessivaiheiden dataa voitaisiin kerätä ja hyödyntää mahdollisimman tehokkaasti koko valutuotteen prosessiketjun aikana. Tästä syystä yksilöllinen tunnistus tulisi saada valuun heti valun syntyhetkellä tai välittömästi sen jälkeen.

Perinteinen valutuotteen merkintä syntyy muotissa olevan merkinnän negatiivista, jolloin valmiissa valutuotteessa merkintä näkyy yleensä kohokuviona valutuotteen pinnassa. Tällä epäsuoralla merkintätavalla valun tunnistus löytyy valusta heti valutuotteen syntyhetkellä. Valutuotteiden yksilöllinen tunnistaminen tosin vaatisi jokaiselle valutuotteelle yksilöllisen

muotin yksilöllisten merkintöjen negatiiveilla. Tämän toteuttaminen erillisenä toimenpiteenä jokaiselle muotille on kuitenkin yleensä todella työlästä ja todennäköisesti ei kovin kannattavaa. 2D-kuviokoodi merkintätapaa onkin eräässä tanskalaisessa tutkimuksessa testattu DISAMATIC -valutekniikkaan, jossa hiekkamuotteihin luotiin automaattisen hiekkakaavauksen aikana yksilöllinen DataMatrix -kuvio muunneltavan pinnityökalun avulla. Testatun pinnityökalun vaatimuksena oli, että pinnien muodostama kuvio kyetään vaihtamaan joka kuudes sekunti, työkalu säilyy toimintakykyisenä hiekan ja pölyn täyttämässä ympäristössä, työkalu kestää kaavauksessa käytetyn 1,6 MPa:n paineen, ja että se toimii luotettavasti myös jatkuvassa käytössä. Testatun pinnityökalun toiminta perustui elektronisesti ohjattuun parafiini-grafiitti seokseen, jonka lämpölaajenemisella pinnien työntymistä työkalussa voitiin ohjailla. Työkalun toimintaperiaatteeksi harkittiin myös muita erilaisia hydraulisia, pneumaattisia, elektronisia ja mekaanisia ratkaisuja, mutta parafiini-grafiitti seokseen oli päädytty, koska parafiini on edullista, se kykenee siirtämään suuren voiman, sillä on suuri lämpölaajenemiskerroin ja se on kemiallisesti inerttiä. Grafiittilisäyksellä parafiini saatiin sähköä johtavaksi, jotta sitä voitiin kuumentaa ja näin ohjailla elektronisesti.(47)

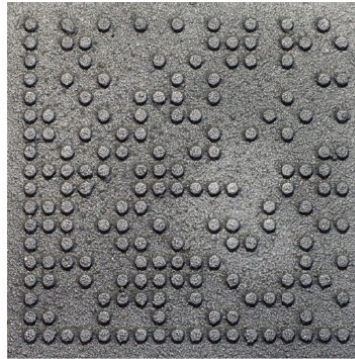
DISAMATIC -valutekniikan toimintaperiaate yhdessä pinnityökalun kanssa näkyy kuvassa 20.



Kuva 20. Pinnityökalun soveltaminen DISAMATIC-valutekniikkaan, jossa pinnityökalussa ensin oleva DataMatrix -kuvio muodostetaan hiekkamuotin pintaan kaavauksen aikana. Seuraavaksi pinnityökalun kuvio vaihdetaan seuraavaa muottia varten ja jo puristettu hiekkamuotti siirtyy eteenpäin valulinjalle, jossa on aiemman pinnikuvion muodostama DataMatrix -kuvion negatiivi. Valettaessa DataMatrix -kuvion negatiivista muodostuu taas alkuperäisen DataMatrix -koodin mukainen kuvio valutuotteen pintaan.(47)

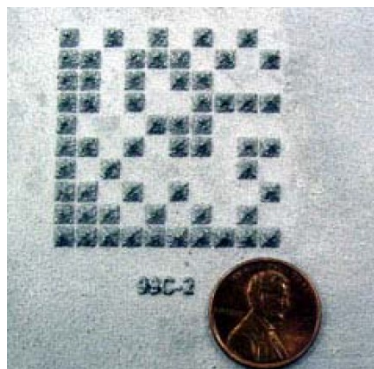
Pinnityökalun avulla muodostettujen kuviointien laaduissa oli suurta vaihtelua riippuen siitä käytettiinkö pinnityökalussa positiivista vaiko negatiivista kuviointia, mikä vaikutti suuresti kuviointin muodostumiseen hiekkamuoteissa. Positiivinen kuviointi tuotti parempilaatuisia kuvia, jolloin DataMatrix -kuvio muodostettiin pinnityökalusta ulospäin työntyvillä pinneillä. Myös valutuotteessa oli tällöin ulospäin työntynyt kuviointi, jonka esimerkinä näkyy kuvassa 21. Negatiivisessa merkintätavassa, jossa DataMatrix -kuvio muodostuisi koloina valutuotteen pintaan, osa datapisteistä jäi kokonaan muodostumatta tai

olivat muuten vain huonosti näkyvissä. Tutkimuksen mukaan positiivisten kuvioiden tulkitseminen onnistui erinomaisesti muodostetuista kuvioista otetun kuvan ja DataMatrix -kuvioiden lukemiseen tarkoitetun ohjelmiston avulla.(47) Vastaavilla tekniikoilla tuotetut 2D-kuviokoodimerkinnot voisivat säilyä valutuotteessa ehkä kaiverrustekniikoita paremmin valutuotteiden jälkikäsittelyissä ja olisivat kaiverrustekniikoita nopeampi tapa toteuttaa yksilöllisiä valutunnisteita.



Kuva 21. Pinnityökalun tuottama DataMatrix -jälki valutuotteessa positiivisella kuvioinnilla.(47)

Lasertekniikoilla hiekkamuotteihin tehtäviä merkintöjä on myös tutkittu. Edellä mainitun pinnityökalun tapaan tekniikka mahdollistaa merkinnän syntymisen heti valutuotteen tuotantokaaren alussa eikä se ole rajoitettu vain DISAMATIC -tekniikalla tuotettaviin valuihin. Esimerkiksi NASA:n julkaisemassa tutkimuksessa kartiomaiset datapisteet DataMatrix -koodiin oli kaiverrettu hiekkamuottiin laserin avulla. Kartiomaiset datapisteet valutuotteessa parantavat merkinnän lukemista, kun valon heijastumat pisteissä tuottavat paremman kontrastin luettavuuteen optisilla menetelmillä.(44)

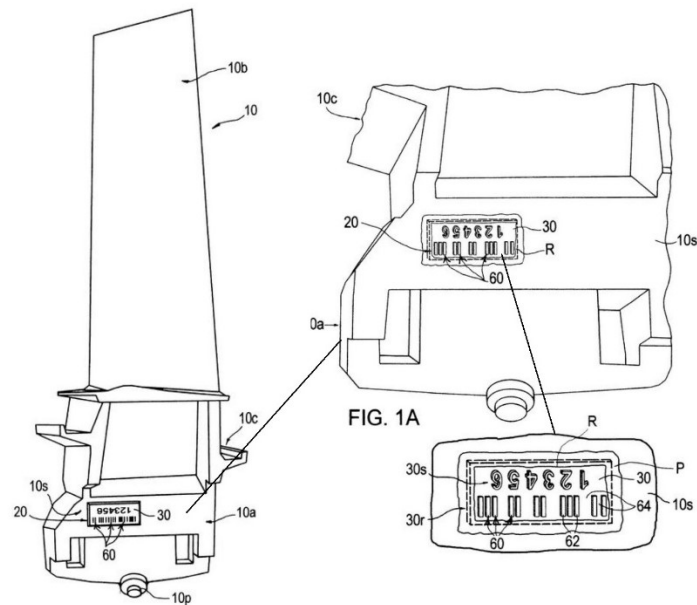


Kuva 22. Hiekkamuottiin laserilla kaiverrettu DataMatrix -koodi valmiissa valutuotteessa.(44)

Esimerkki NASA:n tekemästä laserkaiverruksen tuloksesta näkyy kuvassa 22. Lasertekniikan rajoituksina kaikissa laserkaiverruksissa yleensä on laserin vaatima tasainen tai vain lievästi kaareva kaiverruspinta, laseria ei voi käyttää koneistettavilla pinnoilla ja positiivinen merkintäprofiili valutuotteissa on alttiina vaurioille valujen jälkikäsittelyissä.(44)

Erikseen tarkkuusvaluille löytyy patentti vahamalliin liitettävästä muovisesta viivakoodimerkinnästä, jonka avulla valutuotteeseen voidaan yksinkertaisella ja edullisella menetelmällä luoda yksilöllinen viivakooditunniste. Patentin mukaisesti viivakoodi tuotettaisiin kohokuviointina ohueen muoviliuskaan, joka kiinnitetään vahamallin pintaan. Keraamiseen

muottikuoreen syntyy näin viivakoodin negatiivi ja muoviliuska palaa pois muotin sisältä normaalin vahanpoiston yhteydessä. Esimerkkikuvassa 23 kohokuvioitu viivakoodiliuska on kiinnitettyä turbiinin siiven vahamalliin.(48) Jotta patentin tekniikalla voitaisiin luoda yksilöllisiä valutunnisteita nopeasti ja tehokkaasti, vaatii se muoviliuskoille kohokuvioituja viivakodeja generoivan laitteen. Patentoitua tekniikkaa voitaisiin soveltaa myös 2D-kuviokeihin, jolloin liuskan tarvitsema tila olisi pienempi.



Kuva 23. Turbiinin siiven vahamalliin liitetty kohokuvioitu viivakoodi.(48)

4.2.3. RFID -teknologiat

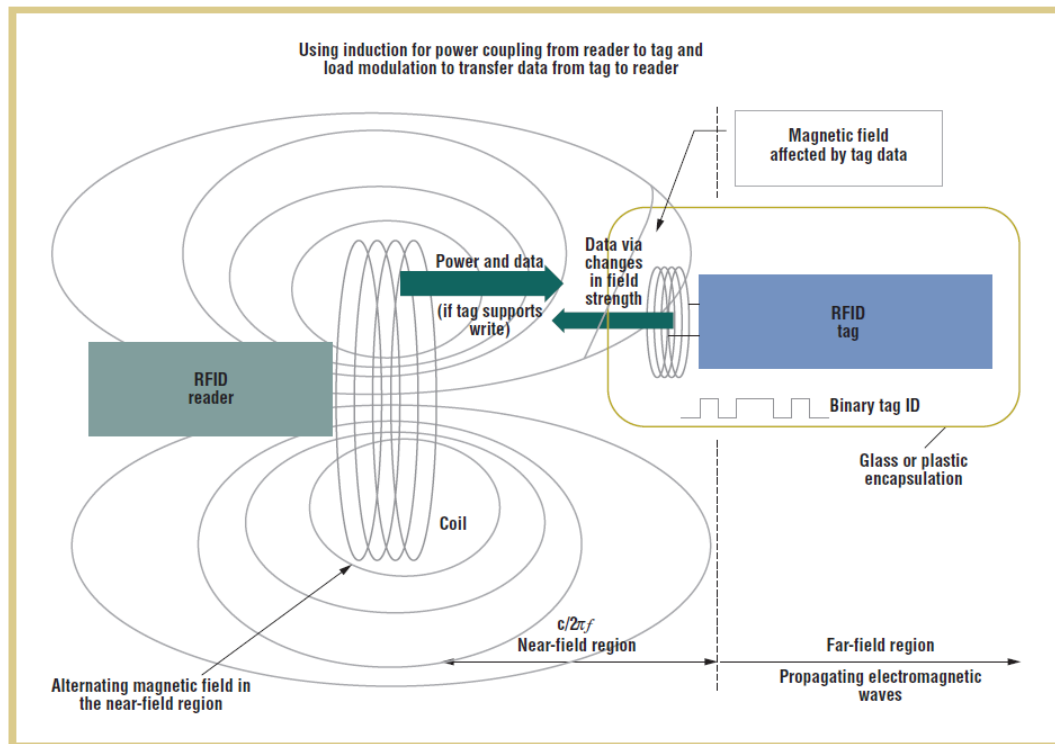
RFID eli Radio Frequency Identification on yksi lupaavimmista tunnistus- ja seurantateknologiainnovaatioista valmistavan teollisuuden aloilla, millä lisätä tuotannon tehokkuutta RFID-tunnisteisiin liitettyjen automaattisten toimintojen avulla(49). RFID-tunnisteet on jo otettu tehokkaaseen hyötykäyttöön varsinkin logistiikan ja varastoinnin seurantasovelluksissa suurissa tavarataloissa, kuten esimerkiksi Wal-Martissa, jossa RFID-tekniikan hyödyntämisellä on saatu merkittäviä parannuksia tuoteketjun tehostamisessa(50).

RFID:n toiminta perustuu radioaalloilla siirrettävään tietoon, joka tapahtuu RFID-tagien, RFID-lukijoiden ja tiedostomuotoa tukevan ohjelmiston avulla. RFID-tag, joka toimii tuotteiden yksilöllisenä tunnisteenä, koostuu tyypillisesti tietojen tallentamiseen tarvittavasta sirusta ja tiedostojen lukuun ja kirjoittamiseen tarvittavasta antennista. Yleisimmin RFID-tagit ovat toiminnaltaan passiivisia eli ne eivät sisällä erillistä virtalähdettä tiedostojen radiotaajuuksilla siirtämistä varten vaan ne saavat käyttövoimansa suoraan RFID-lukijasta langattomasti RFID-tagin antennin keräämän energian avulla.(49) Toki on olemassa myös aktiivisia tai puolipassiivisia RFID-tageja, joista sisäinen virtalähde löytyy integroituna. Tällaiset RFID-tagit ovat yleensä käyttöominaisuuksiltaan monipuolisempia, koska tagit itsessään jo mahdollistavat tietojen automaattisen lukemisen ja kirjoittamisen. Aktiiviset ja puolipassiiviset RFID-tagit mahdollistavat myös suuremmat välimatkat tiedostojen lukemiseen

tai erillisten fyysiseen sijaintiin perustuvien paikannussovellusten käyttämisen tuotteiden seurannassa.(51)

RFID-tageista löytyy siis monenlaisia eri variaatioita ja niiden kustannuksiin ja ominaisuuksiin vaikuttavat pääasiassa RFID-tagien design, toimintataajuus, kapasiteetti, energialähde, luku-/kirjoitusmuistin kapasiteetti ja toimintaetäisyys. RFID-lukijalla tietoa luetaan RFID-tageista tai uutta tietoa voidaan kirjoittaa tageihin. RFID-lukija sisältää radiotaajuuksia tukevan moduulin, ohjausyksikön ja yhden tai useamman radioantennin tiedostojen lukua ja kirjoittamista varten. RFID-lukijalla tuodaan passiivisiin RFID-tageihin tiedostojen lukemiseen tai kirjoittamiseen vaadittava energia, mutta aktiiviset tai puolipassiiviset RFID-tagit eivät sitä tarvitse, koska sisältävät jo oman energialähteen itsenäisten ja automaattisten toimintojen suorittamiseksi. Aktiivisen ja puolipassiivisen RFID-tagin merkittävin ero on siinä, että aktiivinen RFID-tag voi toimia täysin itsenäisesti ja puolipassiivisen RFID-tagin täytyy vähintään olla vuorovaikutuksessa RFID-lukijaan, jolta RFID-tag saa käskyn suorittaa automaattisia toimintoja. RFID-lukijat voidaan yhdistää tuotannonohjausjärjestelmiin joko kiinteällä yhteydellä tai täysin langattomasti, mikä antaa enemmän vapauksia RFID-tekniikkaan perustuvan järjestelmän käytännön toteutukseen ja on lisäksi erinomainen lähtökohta esimerkiksi nykyaikaisten ja monipuolisempien IoT-alustojen hyödyntämiselle.(41, 49, 52)

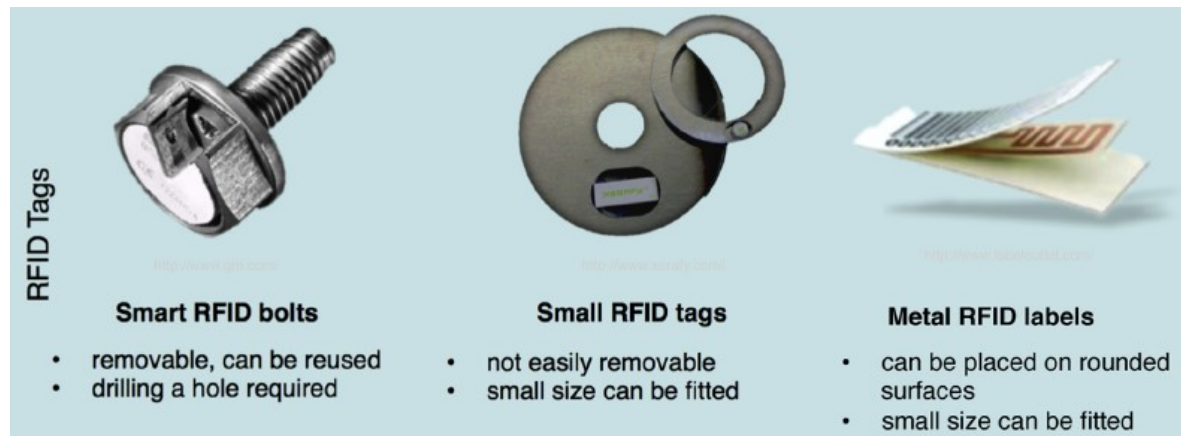
RFID-tunnisteiden lukuetaisyydet riippuvat käytetystä teknologiasta RFID-tunnisteen toteutuksessa. Tehoalue, josta RFID-tagit saavat tarvittavan käyttövoimansa, vaihtelee $10\ \mu\text{W}$ – $1\ \text{mW}$ välillä riippuen RFID-tagin ominaisuuksista. *Near field* -teknologialla toteutettujen RFID-tunnisteiden toiminta perustuu sähkömagneettiseen induktioon ja tekniikalla toteutettujen tunnisteiden lukuetaisyydet ovat riippuvaisia käytettyjen antennien tehosta ja käytetystä toimintataajuudesta joka on yleensä alle 100 MHz. *Near field* -teknologian toimintaperiaate on esitetty kuvassa 24. Samaan tekniikkaan perustuu myös uusimpien älypuhelimien NFC-teknologia(*engl. Near Field Communication*), joka on rajoitettu toimimaan langattomasti alle 20 senttimetrin lukuetaisyyksillä NFC-teknologiaa tukevien laitteiden kanssa. Suositut ISO 15693 -standardin mukaiset *Near Field* RFID-tagit, jotka toimivat 13,56 MHz taajuusalueella ovat NFC yhteensopivia, mikä siis mahdollistaa RFID-tagien lukemisen myös tavallisilla mobiililaitteilla. Pidemmän lukuetaisyyden mahdollistavissa *Far field* RFID-tunnisteissa käytetään taas korkeataajuisempia yli 100 MHz:n taajuusalueita, joista RFID-tunniste valjastaa käyttövoiman dipoliantennien avulla hieman erilailla verrattuna lyhyen kantaman RFID-tunnisteisiin. Tyypillisen *Far field* -teknologiaa tukevan 2,45 GHz:n UHF(*Ultra High Frequency*) passiivisen RFID-tunnisteen lukuetaisyys voi parhaimmillaan ylittää jopa 6 metriin. *Far Field* -teknologialla varustetut RFID-tagit eivät ole NFC yhteensopivia.(53)



Kuva 24. Lähiluettavan RFID-teknologian toimintaperiaate.(53)

Valutuotteiden yksilöllisen tunnistuksen ja seurannan kannalta RFID-tunnisteiden käyttäminen olisi mahdollisuuksiltaan merkittävästi tehokkaampi ratkaisu kuin esimerkiksi 2D-kuviokoodien käyttäminen. RFID:n erinomaisuus 2D-kuviokodeihin verrattuna tulee siitä, että tunnisteiden automaattisen tiedonluvun ja siirtämisen toteutus antaa suuremman suunnitteluvapauden kuin 2D-kuviokoodien kohdalla, jotka ovat täysin riippuvaisia merkinnän sijainnista, valaistuksesta, merkinnän laadusta kuin lukemisetäisyydestäkin. RFID-tageja voidaan taas lukea etänä useampikin yhtä aikaa ja parhaimmillaan jopa useiden metrien päästä RFID-tagin orientaation voiden ollessa vapaammin RFID-lukijaan nähden. Automaattisia RFID-lukijoita olisi siis helppo integroida suoraan tuotannon prosessiketjuihin asentamalla lukijoita esimerkiksi liukuhihnoille, prosessilaitteisiin tai vaikka valutuotteiden siirtelyssä käytettävään truckiin.(41, 50) Toinen merkittävä ero löytyy RFID:n muunneltavuudesta ja huomattavasti suuremmasta tietojen tallennuskapasiteetista. 2D-kuviokoodi joudutaan esimerkiksi uusimaan kokonaan, mikäli kuviokoodin sisältämään tietoon halutaan tehdä muutoksia tai uutta tietoa halutaan lisätä. Lisäksi kuviokoodien rajattu informaation tallennuskapasiteetti pakottaa käyttämään ulkoisia tietojen tallennusservereitä suuremman datamäärän linkittämiseksi yksittäisiin tunnisteisiin. RFID-tunnisteiden tallennuskapasiteetti esimerkiksi valutuotteen yksilöllisessä seurannassa taas mahdollistaa yksilöllisen tunnistekoodin tallentamisen lisäksi koko tuotteen tuotantohistorian ja tuotannossa käytettyjen valuparametrien tallentamisen suoraan yksittäiseen RFID-tunnisteeseen. Ulkoista dataserveriä ei siis välttämättä tarvita ollenkaan valutuotannon eri prosessien sujuvaan toimintaan tai valutuotteen yksilöllisten ominaisuuksien selvittämiseksi paikanpäällä. Tätä tuotannon lähestymistapaa kutsutaan myös termillä *Data-on-tag*.(41)

Turvallisuuskulmasta RFID-tunniste on myös huomattavasti turvallisempi vaihtoehto, kuin viiva- tai 2D-kuviokoodit, joiden sisällön voi lukea oikeastaan kuka tahansa niiden lukemiseen tarkoitetulla skannerilla. RFID-tunnisteiden tieto voidaan taas asettaa salasanan taakse tai tieto voidaan kryptata kokonaan salaiseen muotoon.(54)

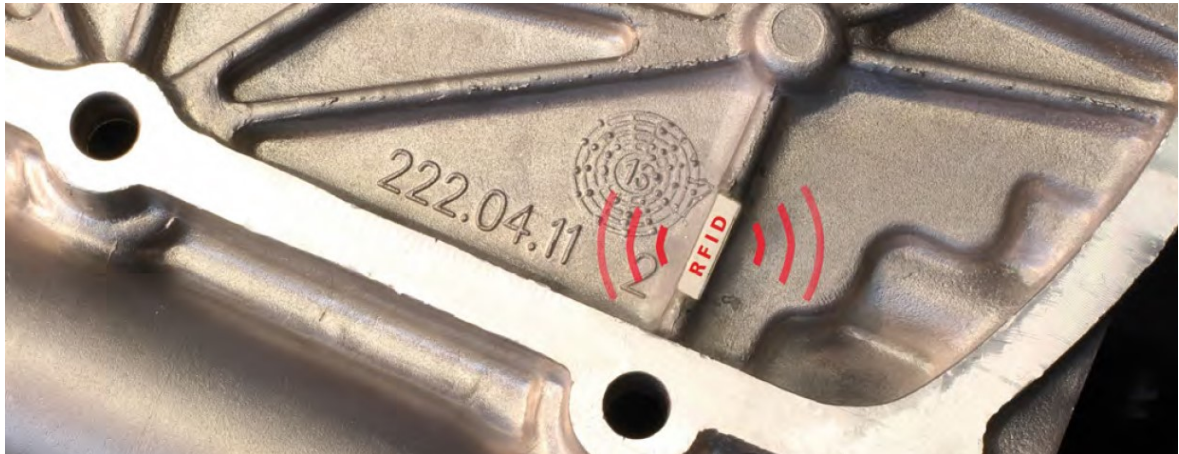


Kuva 25. Erilaisia RFID-tagien toteutustapoja.(41)

Kaupallisista RFID-tagien designvaihtoehtoista löytyy useita eri malleja joita voisi hyödyntää valutuotteiden tunnistuksessa ja seurannassa. Ehkä yleisin RFID-tagien designmalli on ohut ympyrämuoto, jossa RF-antenni on spiraalimuodostelmassa RFID-sirun ympärillä, kuten kuvassa 25 keskellä. Toinen yleinen toteutustapa on suorakulmainen ja litteä RFID-tag, kuten kuvassa 25 oikealla, jonka kiinnittäminen esimerkiksi kaareville pinnoille onnistuu paremmin. Tällaiset RFID-tagit ovat yleensä helposti kiinnitettävissä halutun tuotteen pintaan RFID-tagissa valmiina olevan adhesiivin avulla. Valutuotteen yksilöllisen seurannan osalta, tarrakiinnityksellä toimivalla RFID-merkinnällä on kuitenkin samat ongelmat kuin muillakin tarrakiinnitettävillä merkintätavoilla eli ne eivät säily ehjinä tai ollenkaan valutuotteiden pinnoilla karkeiden käsittelyvaiheiden johdosta. Tästä syystä tarrakiinnitettävien RFID-tagien käyttäminen olisi edullista vain valmiin valutuotteen varastoinnissa ja toimituksessa, joissa RFID-tagit eivät niinkään altistu ulkoisille rasituksille. Paremmin ulkoisia rasituksia kestäisivät erikoisvalmisteiset pultattavat RFID-tagit, jotka voisivat säilyä toimintakykyisinä myös valujen valmistuksen aikaisissa prosesseissa. Pultattavissa RFID-tageissa RFID enemmän on suojassa pultin muotoisen metallisen kuoren sisällä eikä näin ollen olisi niin alttiina ulkoisille rasituksille. Lisäksi mekaaninen kiinnitystapa on huomattavasti varmempi valujen jälkikäsittelyissä. Pultattavan RFID-tagin käyttäminen valutuotteen tunnistuksessa ei edelleenkään ole täysin optimaalinen ratkaisu, koska kyseinen merkintätapa vaatii erillisen porausvaiheen RFID-pultin kiinnittämistä varten ja valutuotteeseen kiinnitetyn RFID-pultin kanta jäisi edelleen valutuotteen ulkopuolelle, jossa se on yhä alttiina ulkoisille rasituksille.(41)

Valun valmistuksen aikaisen tunnistuksen kannalta optimaalisin vaihtoehto olisi integroida yksilöllinen RFID-tunniste suoraan valutuotteen sisään valun kaadon yhteydessä, jossa se säilyisi koskemattomana koko valutuotteen elinkaaren ajan. RFID-tunnisteen ollessa kiinteästi valutuotteen rakenteissa olisi se turvassa valun valmistuksen aikaisilta rasituksilta eikä RFID-tunnisteen poistaminen onnistuisi muuten kuin rikkomalla itse valutuote. Fraunhofer IFAM instituutissa Saksassa valunsisäisiä RFID-tunnisteita on jo pidemmän aikaa tutkittu ja

testattu. Metallien korkeiden sulamislämpötilojen takia tekniikka on mahdollista toistaiseksi vain painevaletulle alumiinille tai alumiinia alhaisemman sulamislämpötilan omaaville metalleille. RFID-tunniste voidaan Fraunhofer IFAM -instituutin patentoimilla tekniikoilla lisätä valutuotteeseen joko valun aikana tai sen jälkeen. Valun aikainen RFID-tunnisteen integroiminen valutuotteeseen vaatii aina RFID-tunnistetta suojaavan ja eristävän rakenteen RFID-elementin ympärille, koska sulaa metallia kestäviä RFID-elementtejä ei ainkaan toistaiseksi ole vielä saatavilla.(55, 56)

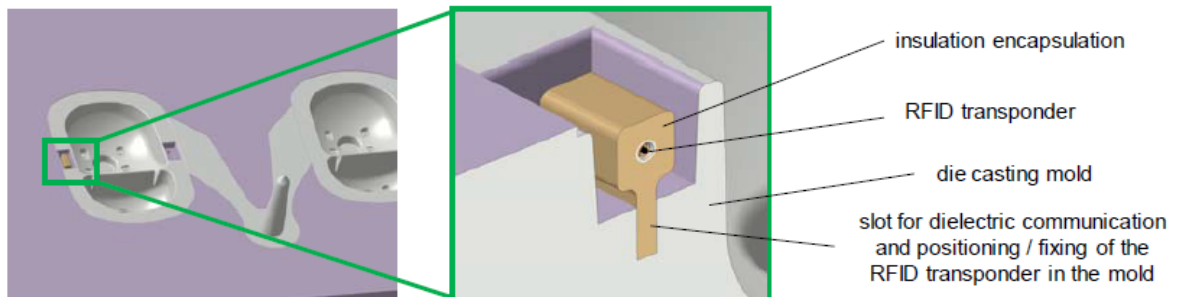


Kuva 26. Yksi mahdollinen valutuotteen sisälle integroidun RFID-tunnisteen toteutustapa.(56)

RFID-tunnisteen toimintaperiaatteen johdosta valunsisäisesti tai valun pinnalle toteutettu RFID-tunniste ei takaa vielä toivottuja tuloksia. Passiivinen RFID-tunniste vaatii toimiakseen RFID-lukijasta saatavan virran ja RFID-tunnisteen ollessa metallisilla pinoilla tai metallin sisällä ei korkeilla taajuuksilla toimivien RFID-tunnisteiden lukeminen onnistu metalliin syntyvien pyörrevirtauksien johdosta. Pyörrevirrat estävät RFID-tunnisteen lukemisen estämällä virran indusoitumisen itse RFID-tunnisteeseen. Metallin pintaan asetettavan RFID-tunnisteen lukemiseen on kaksi vaihtoehtoista tapaa, joilla tunnisteiden lukeminen on mahdollista. Yksinkertaisin tapa on jättää RFID-tunnisteen ja metallipinnan väliin tarpeeksi suuri väli, ettei metallinen pinta enää vaikuta RFID-lukemiseen. Toinen tilaa säästävämpi tapa on ohjata RFID-tunnisteessa syntyviä sähkömagneettisia aaltoja RFID-tunnisteen ja metallipinnan väliin asetettavalla korkean permeabiliteetin omaavalla kalvolla, joka rajoittaa metallisen pinnan aiheuttamaa vaikutusta. Yksi tähän tarkoitukseen sopiva kalvomateriaali on kaupalliselta nimeltään *LIQUALLOY™*, jonka suhteellinen permeabiliteetti voi saavuttaa arvon 50 taajuusalueella 13,56 MHz. Metallin sisään asennettavaan RFID-tunnisteeseen tulee taas jättää metallin pintaan asti ulottuva rako, jonka kautta sähkömagneettiset aallot voivat kulkea. Sähkömagneettiset aallot eivät läpäise metallista kappaletta vaan metalliin kohdistuvat sähkömagneettiset aallot johtavat aina pyörrevirtauksiin metallin pinnassa ja näin estäen tiedonkulun RFID-tunnisteen ja -lukijan välillä. Tosin matalan taajuusalueen sähkömagneettinen säteily pystyy läpäisemään jonkin verran metalliseoksia, joiden suhteellinen permittiivisyys on alhainen.

RFID-tunnisteen toiminnan mahdollistava rako voidaan toteuttaa esimerkiksi dielektrisesti, jolloin rako täytetään RFID-elementtiin asti sähkömagneettisia aaltoja läpi päästävällä materiaalilla, kuten esimerkiksi muovilla, jolloin rako pysyy kuitenkin umpinaisena. Tällöin yhteys RFID-tunnisteeseen säilyy, mutta tunniste itse pysyy suojassa, paikoillaan ja metallista

eristäytyneenä(kuva 26). Raon muoto täytyy suunnitella niin, että sähkömagneettisen aaltoliike pääsee kulkeutumaan raossa siten, että tarpeeksi virtaa voi indusoida RFID-lukijasta tunnistamiseen. Raon muotoilun lisäksi myös antennin design vaikuttaa merkittävän paljon siihen kuinka suurilta etäisyyksiltä ja mistä orientaatiosta RFID-tunniste voidaan metallisen kappaleen sisältä lukea. On myös tärkeää, että kappaleen sisällä oleva RFID-elementti eristetään ympäröivästä metallista tarpeeksi suurella välillä RFID-tunnisteen toiminnan mahdollistamiseksi.(57, 58)



Kuva 27. RFID-insertti valunsisäisen tunnistuksen toteutukseen.(55)

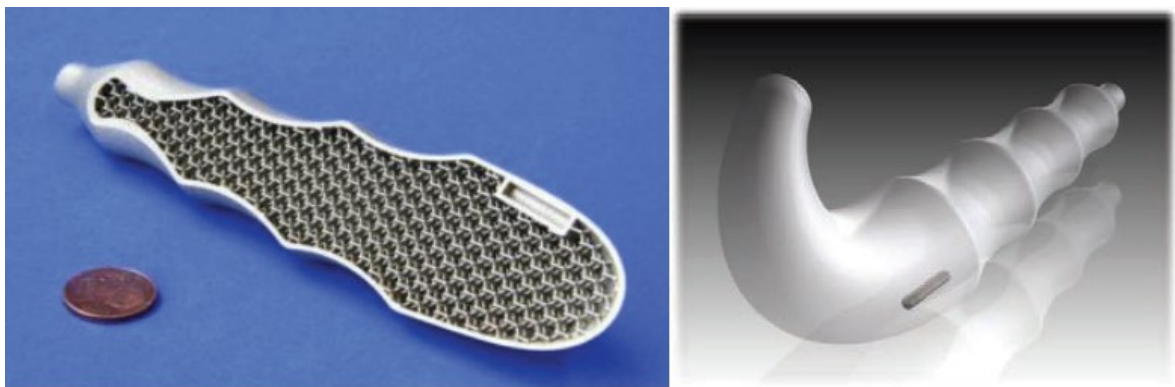
Itse RFID-elementin integroiminen valutuotteen sisälle voidaan toteuttaa esimerkiksi kuvan 27 tavalla. Kuva on Fraunhofer IFAM -instituutin tekemästä tutkimuksesta, jossa henkilöauton sinkkivalettuun takalampun umpioon lisätään valunsisäinen RFID-tunniste valun aikana. Kuvassa 27 valunsisäinen RFID-tunniste syntyy muottiin erikseen asennettavalla insertillä, joka koostuu RFID-transponderista ja korkeita lämpötiloja kestävästä eristävästä materiaalista. Insertissä on kuvan 28 mukainen lasikoteloinen RFID-transponderi valmiiksi asennettuna eristävän materiaalin sisällä. Insertin avulla RFID-tunniste paikoittuu oikeaan kohtaan automaattisesti ja säilyy ehjänä sulan kaadon aikana ja sen jähmettyessä. Muottiin asennettavan valmiin RFID-insertin avulla muodostuu automaattisesti myös RFID-tunnisteen tarvitsema dielektrinen rako.(55)



Kuva 28. Lasikoteloituja RFID-transpondereita(59)

Valutuotteen sisään asennettavan RFID-tunnisteen valinnassa täytyy myös tarkkaan valita RFID-tunnisteen toimintataajuus. Yleisien taajuusalueiden 125 kHz tai 13,56 MHz RFID-tunnisteen lukemista metallikappaleiden sisällä haittaavat erityisesti pyörrevirtauksien syntyminen. Näillä taajuusalueilla RFID-tunnisteen lukuetäisyydet ovat yleensä vain muutamia senttimetrejä. Lukuetäisyyksien kasvattamiseksi täytyisi käyttää korkeataajuisempia

RFID-tunnisteita. Korkeataajuisien RFID-tunnisteiden taajuusalue liikkuu välillä 860 MHz – 3 GHz ja yksi yleinen ja suosittu käytössä oleva taajuusalue on välillä 860 – 960 MHz. Korkeataajuisien RFID-tunnisteiden käyttö metallisessa ympäristössä on kuitenkin vielä hankalampaa kuin matalamman taajuuksien tunnisteiden, koska korkeataajuiset sähkömagneettiset aallot heijastuvat metallisilta pinnoilta kokonaan ja häiritsevät RFID-lukijaa tulevia aaltoja. Tämä johtaa lukuvirheisiin ja häiriöihin RFID-tunnistetta luettaessa. Tästä syystä Fraunhofer IFAM -instituutin käyttämä toimintataajuus valutuotteen sisään integroiduissa RFID-transpondereissa oli ollut 125 kHz, jotta välttyttiin mahdollisimman paljon metallisen ympäristön aiheuttamilta vaikutuksilta. Uusia tapoja suurempien taajuusalueiden RFID-tunnisteiden käyttämiseksi metallisissa ympäristöissä kuitenkin etsitään jatkuvasti, jotta tunnisteiden lukeminen metallisista kappaleista onnistuisi kauempaakin. Ratkaisut ongelmiin voivat löytyä uudella laisella antennisuunnittelulla ja sähkömagneettisia aaltoja absorboivien kalvojen avulla.(55, 57)



Kuva 29. RFID-transponderi lisättynä IN718 nikkelistä valmistetun tuotteen sisään SLM-tulostuksen(*engl. Selective laser melting*) aikana. RFID-tunniste on voitu peittää kokonaan, koska materiaalin suhteellinen permittiivisyys 125 kHz:n taajuusalueella mahdollistaa aaltoliikkeen 1,7 millimetrin läpäisykyvyn valitulla materiaalilla. 13,56 MHz:n taajuusalueella läpäisykyky olisi ollut vain 0,15 mm valitulla materiaalilla.(58)

Valunsisäinen tunnistus voidaan metallivaluissa toteuttaa myös kokonaan edellisestä poikkeavalla tavalla käyttämällä materiaalia lisääviä menetelmiä. Materiaalia lisäävillä menetelmillä RFID-tunniste asetetaan sille varattuun kohtaan kesken metallin tulostuksen ja tulostusta jatketaan RFID-tunnisteen jääden samalla metallituotteen sisään, kuten esimerkiksi kuvan 29 tapauksessa. Ellei metallista tuotetta valmisteta kokonaan tulostamalla, täytyy esimerkiksi jo valmiille valutuotteelle tuotteen pintaan tulostaa RFID-tunnisteen mentävä kotelointi jälkikäteen, mutta muuten toimintaperiaate on sama eli ensin tulostetaan RFID-tunnisteen mentävä kehä, johon RFID-tunniste asetetaan ja tulostusta jatketaan sulkemalla kotelointi. Tässäkin tapauksessa täytyy RFID-tunnisteelle jättää lukemisen mahdollistava dielektrinen rako tai käyttämällä niin pientä taajuusaluetta ja ohutta metallipintaa, että sähkömagneettiset aallot sen vielä läpäisevät.(58, 60)

5. Älykkään koevalun suunnittelu digitaalisin keinoin

Älykkäiden valutuotetunnisteiden käytännön soveltamisessa päädyttiin diplomityössä testaamaan RFID-tunnisteiden suorituskykyä metallisissa valutuotteissa. Fraunhofer IFAM -instituutin aikaisempien saavutusten innoittamana tavoitteena oli integroida RFID-tunniste alumiinisen valukappaleen sisään valun kaadon yhteydessä, jolloin RFID-tunniste pysyisi täysin suojassa valukappaleen myöhemmissä prosessivaiheissa eikä tunnistetta voitaisi poistaa valutuotteesta muuten kuin rikkomalla itse valutuote. Koevalujen yhteydessä mietittiin myös vaihtoehtoisia menetelmiä RFID-tunnisteen käyttämiseksi valutuotteissa.

RFID-tunnisteen integroiminen valutuotteen sisään tai sen käyttäminen edes valutuotteen pinnalla ei ole mitenkään yksinkertaista. Suurin yksittäinen ongelma on sulan metallin korkea lämpötila, mikä sellaisenaan tuhoaa jo minkä tahansa RFID-tagissa olevan elektronisen piirin ja rakenteen. Tällä hetkellä korkeimpia lämpötiloja kestävät RFID-tagit kestävät maksimissaan noin 250 °C lämpötiloja ja niitäkin yleensä vain hetkellisesti. Suhteellisen alhaisen sulamispisteen omaavan alumiininkin sulamislämpötila on jo 660 °C ja valamislämpötila on vielä yleensä reilusti yli 700 °C. Jotta valunsisäinen RFID-tunniste olisi mitenkään mahdollinen, täytyy siis välttyä sulan suoralta kosketukselta RFID-tagiin. Aiemmin esiteltiin, että sulan suoralta kosketukselta voidaan välttyä esimerkiksi erillisen eristemateriaalin käytöllä, jolloin RFID-tagin ympärillä olisi metallisulalta suojaava eristekerros. Lämpötila ei saisi ylittää kriittistä rajaa myöskään eristekerroksen läpi johtumalla, joten eristekerroksen lämmöneristys ja -kestävyys tulisi olla huipussaan, ja jotta eristekerroksen fyysinen koko pysyisi vielä realistisena valutuotteeseen toteutettavana ratkaisuna. Erona Fraunhofer IFAM -instituutin tekemiin koevaluihin valunsisäisten RFID-tunnisteiden toteutuksessa, tehdään tässä diplomityössä alumiinivalut hiekkavaluina painevalun sijaan. Hiekkavalun huomattavasti hitaampi jähmettymis- ja jäähtymisaika tuo oman lisähaasteensa niin eristysrakenteen toteutukseen kuin jäähtymisaikojenkin hallintaan, mutta onnistuessaan hiekkavaluissa olisi tekniikka sovellettavissa varmemmin myös muilla valutekniikoilla.

Toisena vaihtoehtona esiteltiin myös metallisen koteloinnin 3D-tulostaminen RFID-tagin ympärille jälkikäteen, jolloin suoraan RFID-tagiin kohdistuva kuumuus ei pääse ylittämään kriittistä rajaa. Kokeellisesti tätä ei kuitenkaan tässä diplomityössä testata, koska tekniikka soveltuu lähinnä erikoisratkaisuksi.

Vaikka RFID-tunniste onnistuttaisiin saamaan ehjänä valutuotteen sisään, ei sen toimintakyvystä ole edelleenkään mitään takeita. RF-tekniologioiden toiminta metallisissa ympäristöissä on hyvin rajallinen pyörrevirtauksien synnyn ja sähkömagneettisen säteilyn metallisilta pinnoilta heijastumisen vuoksi, joten täysin metallisen valutuotteen sisään suljettu RFID-tag ei todennäköisesti kykene kommunikoimaan ulkomaailman kanssa ollenkaan. RFID-tagille tulisi siis valutuotteesta jättää valutuotteen pintaan asti ulottuva dielektrinen rako, jota kautta RFID-lukijan ja RFID-tagin välinen kommunikointi voisi onnistua. Dielektrinen rakokaan ei vielä takaa RFID-tunnisteen toimintaa valukappaleessa vaan siihen vaikuttaa myös RFID-tagin sijainti suhteessa dielektriseen rakoon, raon muoto ja koko, RFID-tagin rakenne ja käytetty toimintataajuus. Toisin sanoen, ennen kuin minkäänlaista RFID-tunnistetta valetaan valutuotteen sisään, täytyy varmistaa RFID-tagin toimivuus ja vähimmäisvaatimukset vastaavissa olosuhteissa. Tulee myös selvittää onko RFID-tunnisteen suorituskyky

riittävä lopullisessa käyttötarkoituksessaan. Esimerkiksi pienen taajuusalueen RFID-tunnisteen käytössä muutaman sentin lukuetaisyys ei välttämättä ole riittävä automaattisten toimintojen käytännön sovelluksissa ja suuremman taajuusalueen RFID-tunniste, joka mahdollistaisi pidemmän lukuetaisyyden, ei välttämättä taas toimisi ollenkaan samalla toteutusmuodolla.

5.1. Koejärjestelyt ja valuprosessin suunnittelu

Lähtökohtana hiekkavaluun asennettavan valunsisäisen RFID-tunnisteen toteutukseen käytettiin kuvan 27 toteutustapaa eli RFID-kapseli asennettaisiin lämpöä eristävästä materiaalista valmistetun insertin sisälle. Insertti olisi muotoiltu siten, että se tuottaisi automaattisesti RFID-tunnisteen lukuun vaadittavan dielektrisen raon ja tunnisteen paikoittaminen hiekkamuottiin olisi helppoa. Kuva 27 on ote Fraunhofer IFAM -instituutin julkaisusta liittyen painevalukappaleen valunsisäisen RFID-tunnisteen käytännön toteutukseen.

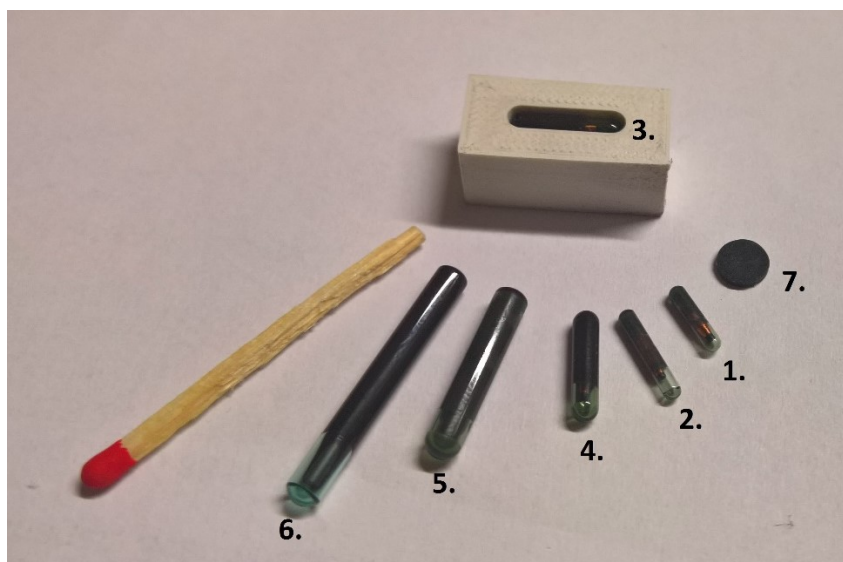
Käytännön osuus aloitettiin selvittämällä valunsisäiseen tunnistukseen mahdollisesti soveltuvien RFID-tagien saatavuus ja erikseen Fraunhofer IFAM -instituutin käyttämien RFID-tagien saatavuus. Kokeen kannalta helpottava tieto oli, että instituutin käytössä olleet transponderit/tagit olivat kaupallisesti saatavilla olevia lasikapseloituja RFID-transpondereita, joiden vastaavia malleja käytetään yleisesti muun muassa lemmikkieläinten ihonalaisina tunnistesiruinä. Alumiinisia hiekkavaluja varten päädyttiinkin tilaamaan vastaavanlaisia RFID-transpondereita, koska kyseisillä transpondereilla oli yleisesti hyvät lämmönkestävyysominaisuudet ja ne toimivat hyvin metallisissa ympäristöissä sisäänrakennettujen ferriittisten absorptioytimiensä ansiosta. Lisäksi kapselin muotoon rakennetut RFID-transponderit olivat pienimpiä saatavilla olevia RFID-tunnisteita, joten niiden käytännön toteutus pienenkin kokoluokan valutuotteissa olisi näin mahdollista.

RFID-tageja tilattiin kahdella eri toimintataajuudella, jotta matalataajuuksien ja korkeataajuuksien RFID-tunnisteiden suorituskykyä voitaisiin vertailla samanlaisissa ympäristöissä. Pienin koekäyttöön hankittu kapselin muotoinen RFID-tag oli pituudeltaan vain 9 mm ja halkaisijaltaan 2,12 mm. Tilattujen kapselin muotoisten RFID-tagien kappalehinnat vaihtelivat 1,20 – 1,70 € välillä, mutta tukuittain tilattuna olisi saanut hintoja laskettua. Taulukossa 7 on eriteltynä kaikki koevaluja varten hankitut RFID-tunnisteiden mallit ja ominaisuudet. Hankittujen RFID-tunnisteiden kuvat näkyvät taas kuvassa 30.

Matalataajuuksien RFID-tagien lukemista varten hankittiin pienikokoinen iDTRONIC:in USB Stick Reader EVO -RFID-lukija. Kyseisen lukijan ilmoitettu RFID-tagien maksimilukuetaisyys oli noin 8 cm RFID-tagin tyypistä riippuen. Lukijan kotelointimateriaalina oli käytetty ABS-muovia. Korkeampitaajuuksien RFID-tagien lukemista varten hankittiin työpöytäkäyttöön tarkoitettu metraTec DeskID ISO RFID Desktop -RFID-lukija. Kyseisen lukijan RFID-tagien lukuetaisyydet ilmoitettiin vaihtelevan 5 ja 10 senttimetrin välillä riippuen luettavien RFID-tagien tyypeistä. Molemmat hankitut RFID-lukijat voitiin USB-johdon avulla liittää suoraan kannettavaan tietokoneeseen RFID-tagien lukua ja kirjoittamista varten. Lisäksi hankittiin TDK:n valmistamia, 13,56 MHz:n RFID-tageille tarkoitettuja, absorptiokalvoja, jotta absorptiokalvon vaikutusta metalliympäristössä voitaisiin myös tutkia.

Taulukko 7. Hankittujen RFID-tagien vertailutaulukko. Juokseva numero vastaa kuvan 30 numerointia.

Nro	Kuvaus	Malli	Koko [mm]	Taajuus-alue	Muisti [bit-tiä]	Maksimi (varastointi/huippu) lämpötila
1	HID Glass Tag EM 4305(Increased range)	Kapseli	2,12 x 9	134,2kHz	512	+140 °C (10h)
2	Glass Tag Hi-tag S256	Kapseli	2,12 x 12	125kHz	256	+140 °C (10h)
3	Glass Tag Hi-tag S256	Kapseli	3,15x13,3	125kHz	256	+140 °C (10h)
4	Glass Tag HT S2048	Kapseli	3,15x13,3	125kHz	2048	+125 °C
5	HID Glass Tag I-Code SLIX	Kapseli	4 x 22	13,56MHz	1024	+140 °C (10h)
6	TI Glass Transponder	Kapseli	3,9 x 32	134,2kHz	80	+85 °C
7	iMini Tag	Pyöreä	1,05 x 6,2	13,56MHz	1000	+90 °C (168 h)



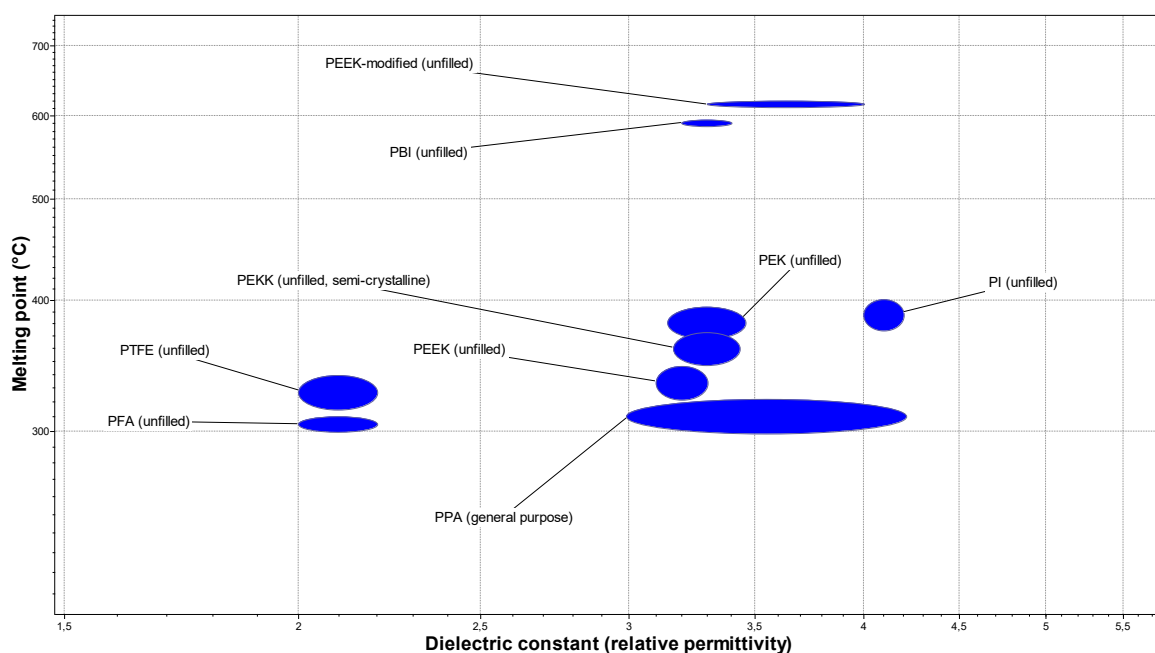
Kuva 30. Koevaluja varten hankitut RFID-tagit.

5.1.1.

RFID-insertin suunnittelu ja toteutus

RFID-insertin suunnittelu aloitettiin materiaalinvalinnalla. Pääasiallisina materiaalivaatimuksina olivat erinomainen lämmönkesto ja hyvät dielektriset ominaisuudet, jotta insertti kestäisi hetkellisen sulan metallikosketuksen ja sähkömagneettinen kommunikointi onnistuisi valitun materiaalin läpi. Kolmantena vaatimuksena oli materiaalin koneistettavuus, jotta insertin ylijäävä paikoitusosa voitaisiin siististi poistaa valutuotteen pinnalta jälkikäteen. Materiaaliryhmä rajattiin täten koskevan vain polymeerejä.

Materiaalinvalinnassa apuna käytettiin CES EduPack -materiaalinvalintaohjelmaa, jonka avulla tehtiin karkea rajausta korkeiden lämpötila-alueiden polymeereistä, ja joiden dielektriset ominaisuudet olisivat tarkoitukseen riittäviä. Ideaalimateriaalina olisi kestonmuovi, jolla on erittäin korkea sulamislämpötila, johtaisi hyvin huonosti lämpöä ja sulamislämpötiloissa käyttäytyisi lähinnä amorfisesti eikä palaisi. Materiaalivaihtoehtoja rajattiin koskevan siis vain materiaaleja joiden sulamislämpötila oli yli 300 °C, ja joiden dielektrinen vakio oli alle 4. Vaihtoehtojen määrän edelleen ollessa suuri, rajattiin vaihtoehtojen koskevan vain puhtaista materiaaleista koostuvia muoveja ilman lujitelisäyksiä. Lujitteet, kuten esimerkiksi lasikuitu tai hiilikuitu vain parantaisivat muovien lämmönjohtamisominaisuuksia, mikä ei taas ole koevalun kannalta toivottavaa. Nyt vaihtoehtoiksi jäivät kuvan 31 mukaiset vaihtoehdot, jotka otettiin mukaan tarkempaan taulukkovertailuun. Taulukosta 8 löytyy rajattujen materiaalivaihtojen muut ominaisuudet. Yleisen elektroniikkatuotteiden kotelointiin käytetyn ABS-muovin ominaisuudet on lisätty taulukkoon 8 referenssiksi.



Kuva 31. CES EduPack -ohjelman avulla rajatut materiaalivaihtoehdot RFID-insertille. Ideaalimateriaali sijoittuisi aivan kuvaajan vasempaan ylänurkkaan.

Taulukko 8. Materiaalivaihtoehtojen vertailutaulukko. Taulukon arvot ovat keskiarvoja materiaaliominaisuuksien normaaleista vaihtelurajoista.(61)

	ABS	PI	PBI	PEKK	PEK	PFA	PPA	PTFE	PEEK	PEEK(modified)	
Price	2,52	37,6	206	109	90,85	41,1	6,88	12,15	87,8	70,1	E/kg
Density	1,06E+03	1,38E+03	1,30E+03	1,31E+03	1,30E+03	2,19E+03	1,14E+03	2,17E+03	1,31E+03	1,30E+03	kg/m ³
Young's modulus	2,42	2,42	5,85	4,41	3,85	0,483	1,84	0,476	3,86	3,1	Gpa
Yield	44	87,9	145	138	118	14,5	49,75	20,7	91	72,5	MPa
Hardness	13,9	26,4	43,25	*88	33,45	4,35	14,95	6,2	27,3	!	HV(*Rockwell M)
Glass temperature	105	250	426	161,5	191	108,5	127	123,5	150	158	°C
Max service temperature	70	231	310	!	196,5	260,5	116	260,5	249,5	!	°C
Thermal conductivity	0,259	0,136	0,405	0,25	0,298	0,252	0,225	0,252	0,25	0,22	W/m.°C
Heat capacity	1,72E+03	1,42E+03	1,34E+03	1,52E+03	1,48E+03	1,04E+03	1,59E+03	1,03E+03	1,34E+03	1,54E+03	J/kg.°C
Dielectric constants	3	4,1	3,3	3,3	3,3	2,1	3,6	2,1	3,2	3,65	
Melting point		388	591	360	381	305	310,5	327	334	615,5	°C
Melt temperature	197,5	391,5	568	!	404,5	354,5	308,5	!	374	377	°C

! = No data available

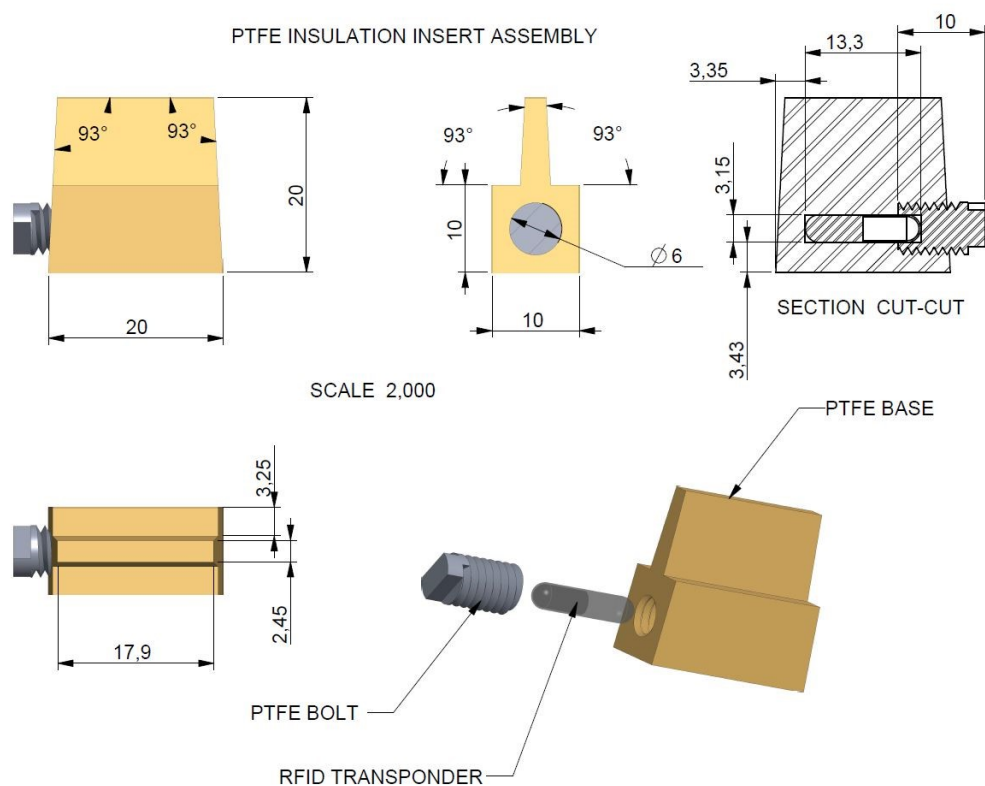
RFID-insertiksi sopivan materiaalin valinta tehtiin taulukon 8 ominaisuuksia vertailemalla. Kuten odotettavissa, polymeeriä, jonka sulamislämpötila olisi korkeampi kuin alumiinin sulamislämpötila, ei ole saatavilla. Osalla materiaaleista, kuten PBI:n ja modifioidun PEEK:in sulamislämpötilat ovat kuitenkin jo hyvin lähellä alumiinin sulamislämpötilaa. Suhteellisen korkeat sulamislämpötilat ovat myös materiaaleilla PI, PEKK, PEK ja PTFE. Koska valittavan materiaalin käyttäytyminen sulan metallin kanssa on vaikea ennustaa eikä soveltuvan materiaalin ominaisuudet ole riippuvaisia pelkästään korkeasta sulamislämpötilasta, arvoitiin materiaalien soveltuvuutta käyttökohteeseen myös maksimikäyttö- ja sulankäsittelynlämpötila-alueiden avulla. Tiedossa oli siis, että yksikään taulukon 8 materiaaleista ei tule säilymään täysin kiinteässä olomuodossa sulan alumiinin kosketuksessa ja mahdollisen insertin pintakerrokset eivät todennäköisesti tule valuprosessissa säilymään pelkillä muodonmuutoksilla. Tavoitteena oli kuitenkin saada insertti säilymään valussa mahdollisimman vähäisin vaurioin. Materiaalivaihtoehdoista tähän tarkoitukseen parhaiten soveltuvat vaihtoehdot voisivat olla siis materiaalit PI, PBI, PEK tai modifioitu PEEK. Erityisesti materiaalien PBI ja modifioidun PEEK:in erinomaiset lämmönkesto-ominaisuudet voisivat olla tarkoitukseen sopivia. Tosin PBI:n lämmönjohtavuus on suurempi kuin minkään muun vertailun materiaaleista, mikä ei ole inserttiin sijoitettavan RFID-transponderin ehjänä säilymisen kannalta toivottavaa.

Kyseiset materiaalit ovat hintaluokaltaan melko kalliita ja valusisäisen RFID-tunnisteen käyttöratkaisun tulisi taas olla mahdollisimman edullinen, jotta tunnisteen käyttäminen toisi lisäarvoa eikä vain lisäkustannuksia. Paremman saatavuuden ja edullisemman hinnan puolesta päädyttiin lopulta testaamaan materiaalia PTFE eli polytetrafluorieteeniä, joka tunnetaan paremmin kauppanimellä Teflon. Teflonilla tehtyjen testien perusteella voitaisiin jälkikäteen arvioida hiekkavaluihin sovellettavan tekniikan yleistä toimivuutta. Teflonin sulamislämpötila on noin 327 °C eikä se reagoi juurikaan muiden aineiden kanssa 290 °C alemmissa lämpötiloissa. Teflonin lämmönjohtavuus on huono ja dielektriset ominaisuudet ovat tarkoitukseen erinomaiset, joten tältä osin RFID-transponderin toimintaan ja valussa ehjänä säilymiselle olisi edellytyksiä.

Inserttien valmistusta varten tilattiin lopulta 10 millimetriä paksu Teflon-levy. Tilatun Teflon -levyn neliömetrihinta oli 1200 €, joten mitenkään edullisesta materiaalista ei tässäkään yhteydessä voi puhua.

Huomioitavaa oli kuitenkin se, että Teflon kehittää pieniä määriä myrkyllistä ja syövyttävää fluorivetyä hajoamistuotteena yli 250 °C lämpötiloissa, joten valukoetta varten täytyi kiinnittää erityishuomiota ilmanvaihtoon(62). Oletettavasti kuitenkin pieni käytössä oleva Teflonin materiaalmäärä ja hiekkamuotin sisällä oleva vähähappinen, lähes täysin eristetty, ympäristö kuitenkin rajoittaisi haitallisten reaktiotuotteiden muodostumista.

Lopullisen hiekkamuottiin asennettavan insertin toteutuksen suunnittelussa käytettiin Creo 3.0 3D-suunnitteluohjelmaa, jonka avulla määriteltiin Teflon -insertin fyysiset mitat eri RFID-transpondereille. Suunnittelun lähtökohtana käytettiin kuvan 27 malliratkaisua, jolloin transponderia suojaavan materiaalikerroksen paksuutena käytettäisiin maksimissaan noin RFID-transponderin halkaisijaa. Tätä paksumpi eristekerros ei olisi enää käytännöllinen toteuttaa sen suuren tilantarpeen vuoksi valutuotteessa. Dielektrisen raon määrävän osan paksuudelle käytettiin samaa periaatetta. Ohuempi paikoitusosa voisi helpommin palaa kokonaan pois eikä RFID-kommunikointiin jäisi näin riittävä rakoa. Paksumman rakokoon mahdollistavan paikoitusosan käyttäminen ei taas olisi käytännöllistä. Insertin muoto mahdollistaa nyt RFID-transponderin ankkuroitumisen alumiinisen valutuotteen sisälle, mikä on vielä erityisen tärkeää juuri mihinkään materiaaliin tarttumattoman Teflonin kanssa.



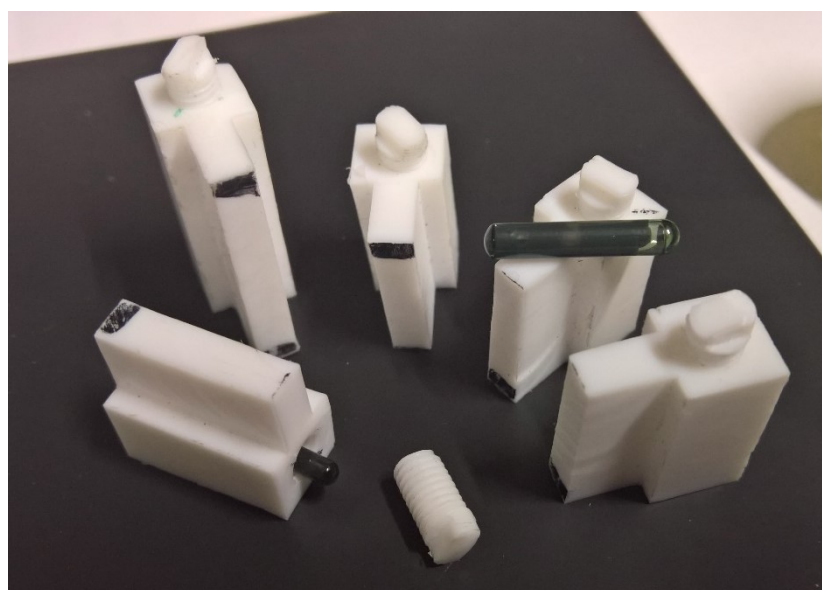
Kuva 32. Teflon -insertin kokoonpanopiirustus.

Insertin suunnittelussa täytyi vielä ratkaista, miten RFID-transponderi saataisiin kokonaisuudessaan suljettua Teflon -materiaalin sisään. Vaihtoehtoiksi mietittiin liimattavia insertin puolikkaita tai transponderille tehdyn poratun reiän tukkimista niittaamalla tai liimaa käyttäen. Lopulta päädyttiin ratkaisuun, jossa inserttiaihioon porattiin RFID-transponderin mentävä reikä ja porattiin vielä toinen 6 millimetrin syvyyteen ulottuva reikä M6 kiertelle ruuville. Teflon -levystä valmistettiin erikseen M6 kiertettä vastaavat erikoisvalmistetut pienet ruuvit reikien sulkemista varten. Teflon -insertin 2D-kokoonpanokuvat 3,15 x 13,3 mm kokoiselle transponderille näkyvät kuvassa 32. Inserttiaihion ohuemman paikoitusosan muodot tehtiin käsin yläjyrsimen avulla ja M6 kiertet tavallisia käsin käytettäviä kierrettyökaluja käyttäen. Ennen hiekkamuottiin asentamista Teflon -ruuvien insertin ulkopuolelle jäävä osa katkaistiin insertin tasalle. Lopuksi hiottiin tai leikattiin tarvittavat viisteet ja pyöritykset.

Mekaanisen ruuviratkaisun avulla koko Teflon -insertti oli yhtä ja samaa materiaalia eikä tarvinnut miettiä kestäisikö erillinen liima- tai niittiratkaisu valun aikana. Näin ollen mahdolliseen RFID-transponderin hajoamiseen johtavia syitä ei ainakaan tarvitsisi etsiä transponderin sulkemistekniikasta. Koevaluihin valmistettuja Teflon -ruuveja ja -inserttiaihoita näkyy kuvissa 33 ja 34.



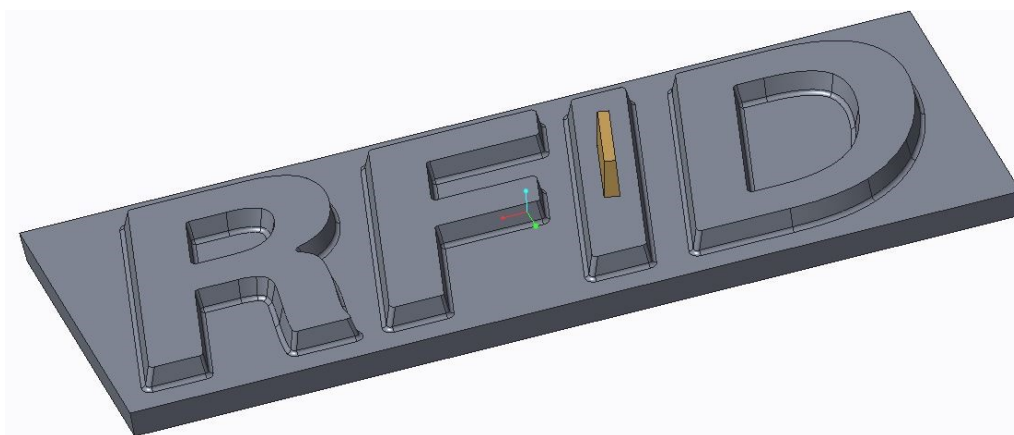
Kuva 33. Valmistettuja RFID -insertin Teflon -ruuveja.



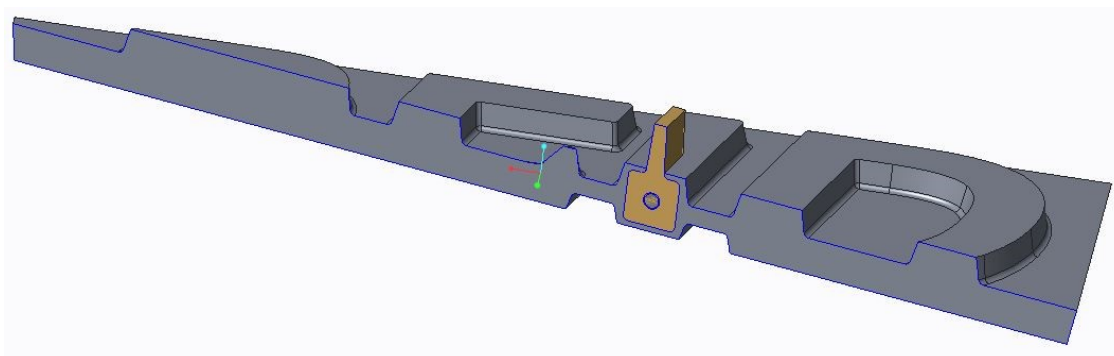
Kuva 34. Valmistettuja RFID -inserttien kokoonpanoaihoita erikokoisille RFID-transpondereille.

5.1.2. Valutuotteen suunnittelu

Valunsisäisen RFID-tunnisteen testaamiseen ei ollut valmista valutuotetta, johon integroitu RFID-tunniste tulisi saada sisällytettyä, joten valutuote voitiin näin suunnitella täysin RFID-tunnisteiden vaatimusten mukaan. Koska testivaluja tehtäisiin mahdollisesti useita ja useilla eri RFID-transponderien kokoluokilla ja taajuusalueilla, suunniteltiin koevaluissa käytettävä tuote suhteellisen yksinkertaiseksi ja pienikokoiseksi. Valutuotteeksi mallinnettiin lopulta kuvan 35 mukainen laattamalli, jossa kohokirjaimet. RFID-transponderin paikan haluttiin jäävän keskivaiheille valutuotetta, joten RFID-insertille suunniteltiin paikka I-kirjaimen keskeltä.



Kuva 35. Koevalua varten suunniteltu yksinkertainen valutuote, jossa RFID-insertti.

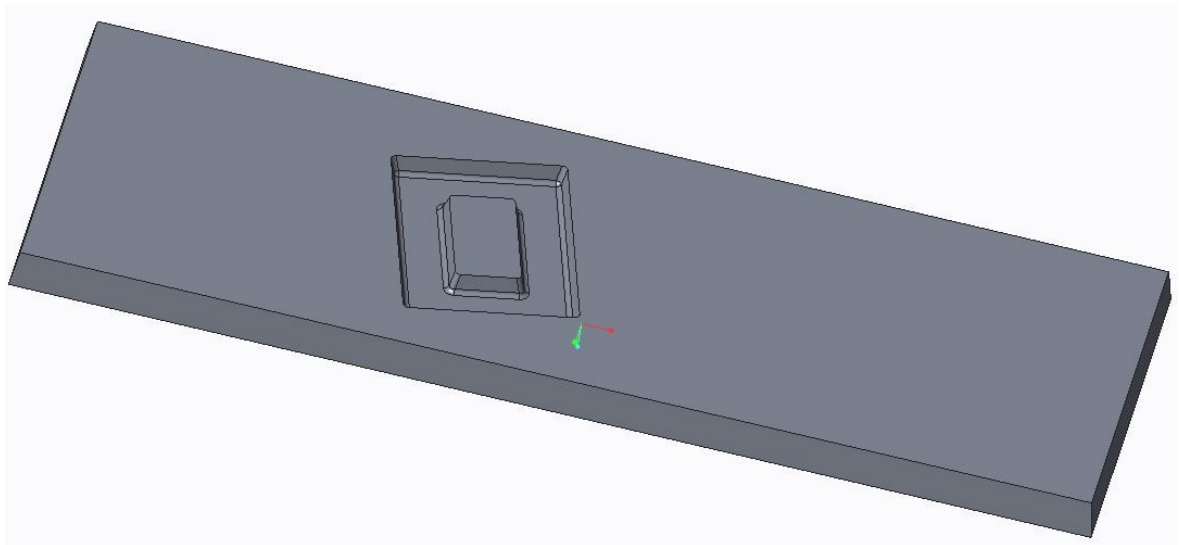


Kuva 36. Poikkileikkaus RFID-insertin sisältävästä valutuotteesta.

Alumiinista hiekkavalua suunnitellessa täytyi huomioida, että materiaalipaksuuden tulisi olla vähintään 3 mm valutuotteen eri osissa, jotta valun täydellisestä täyttymisestä valun aikana voitaisiin varmistua. Tosin RFID-insertin ympärillä oleva suuri sulan materiaalmäärä johtaisi todennäköisemmin RFID-transponderin tuhoutumiseen hitaamman jäähtymisen johdosta. Materiaalipaksuudet insertin kohdalla minimoitiin tästä syystä laatan ja kohokirjaimien paksuutta säätämällä. Koska RFID-insertin materiaali tulisi olemaan jokin huonosti lämpöä johtava polymeeri, jätettiin insertin ympärillä oleva alumiinikerros vielä pienemmäksi kuin suositeltu 3 millimetrin materiaalipaksuus. Toisin sanoen insertin ei ar-

vioitu jäädyttävän sulaa alumiinia niin nopeasti, että se estäisi ohuimpien kohtien täyttymisen kokonaan. Lisäksi ohuimmat materiaalikerrokset ovat kokonaisuudessaan ympäröitynä vahvemmillä materiaalikerroksilla, joten joka puolelta ohuimpiin kohtiin saapuva sula parantaisi ohuimpien kohtien nopeaa täyttymistä. Ohuimmat valutuotteen kohdat olivat nyt vain yhden millimetrin paksuisia RFID-insertin ympärillä.

Nopean täyttymisen lisäksi tulisi alumiinin jähmettyä ja jäähtyä RFID-insertin ympärillä mahdollisimman nopeasti. Tästä syystä valutuotteen kääntöpuolelle tehtiin vielä erillinen kevennys RFID-insertin ympärille, jotta pienempi materiaalmäärä insertin ympärillä nopeuttaisi jäähtymistä ja parantaisi todennäköisyyksiä RFID-transponderin ehjänä valusta selviytymiseen. Kevennyksen toteutus ja RFID-inserttiä ympäröivä materiaalmäärä ovat havaittavissa kuvista 36 ja 37.

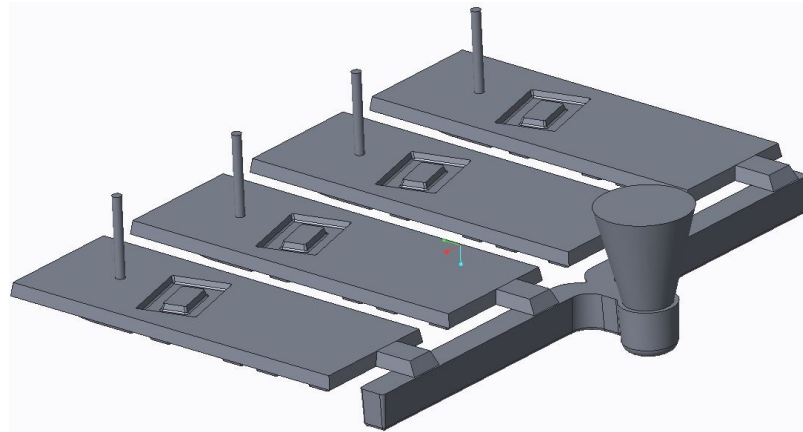


Kuva 37. Valutuotteen kääntöpuoli. RFID-inserttiä varten tehty kevennys, jotta jäähtyminen ja RFID-insertin ehjänä säilyminen olisi todennäköisempää.

5.1.3. Valujärjestelmän suunnittelu ja optimointi

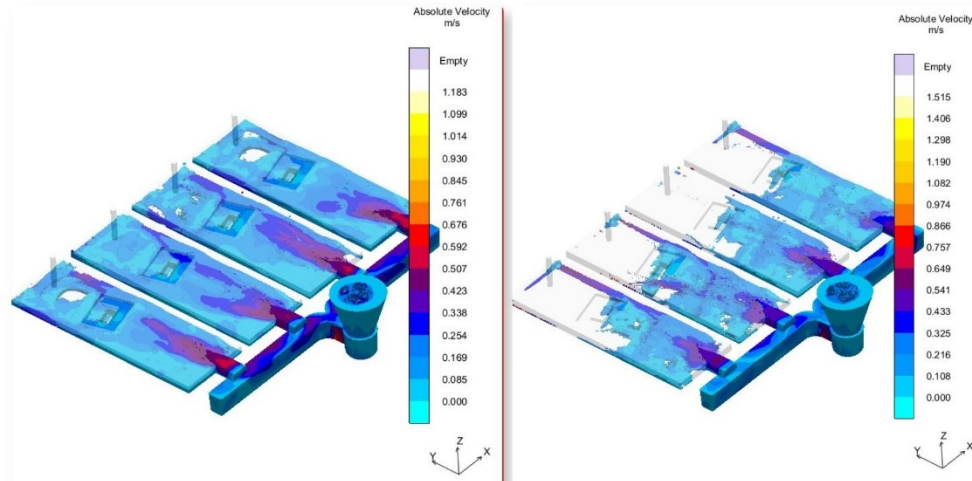
Suunnitellulle valutuotteelle suunniteltiin hiekkavaluun soveltuva valujärjestelmä. Valujärjestelmä suunniteltiin neljälle valutuotteelle, jotta testikappaleita saataisiin yhdellä valulla useampia. Valujärjestelmän fyysinen koko kasvaisi turhan suureksi, jos valutuotteita olisi samassa valujärjestelmässä vielä enemmän. Ensimmäinen versio suunnitellusta valujärjestelmästä näkyy kuvassa 38. Valujärjestelmään kuuluu neljä erillistä valutuotetta, neljä sisäänmenoa, neljä ilmanpoistokanavaa, jakokanava ja kaatokanava.

Valujärjestelmä suunniteltiin alusta alkaen hiekkakaavaukseen sopivaksi, joten jakotaso päätettiin ennen mallinnuksien aloittamista ja tarvittavat päästöt lisättiin suoraan kaikkiin valujärjestelmien osiin. Päästöjen suuruudet määräytyivät standardin SFS-EN 12890 mukaisesti, jolloin päästöjä vaativien pintojen seinämäkorkeuksien vaihtelut 3,5 – 25 millimetrin välillä vaativat 1 millimetrin avutumat päästöiksi(63). Päästöasteet vaihtelivat tässä tapauksessa välillä 5° - 16°, jolloin matalamman seinämäkorkeuden päästöpinnat vaativat suurempia päästöjä.



Kuva 38. Valujärjestelmän ensimmäinen versio pienillä muutoksilla.

Valujärjestelmän yleinen toimivuus testattiin ensin yksinkertaisella simuloinnilla *MAGMA*⁵-ohjelman avulla. Simuloinnin alumiiniksi valittiin AlSi7Mg -seos ja sen valulämpötila asetettiin arvoon 740 °C. Muottihiekan materiaaliksi valittiin SiO₂ -seos ja sen alkulämpötilaksi asetettiin 20 °C. Muotin rakentaminen toteutettiin tässä vaiheessa *MAGMA*⁵ -ohjelman muotin automaattisesti generoivan työkalun avulla. Simulointitulosten perusteella lähes valutuotelaattojen päissä sijainneiden ilmanpoistokanavien paikkaa siirrettiin valutuotteiden D-kirjainten keskelle, koska simulointitulosten mukaan kyseinen kohta täyttyisi lähes viimeisenä. Tällä muutoksella loukkuun jäävän ilman määrää valutuotteessa pyrittiin vähentämään.



Kuva 39. Valujärjestelmän ensimmäisen simulointikierroksen tuloksia. Näkymät ovat otteita sulan nopeuksista valujärjestelmässä eri ajankohdissa. Vasemmalla olevan näkymän perusteella ilmanpoistokanavien paikkaa siirrettiin hieman.

Suunnitellun valujärjestelmän sisäänmenot sijoitettiin tarkoituksenhakuisesti hieman epäsymmetrisesti valutuotelaattojen sivuille ja jakokanavan poikkileikkauksen annettiin pysyä samanlaisena koko pituudeltaan, jotta valutuotteiden täyttyminen ei tapahtuisi täysin samanaikaisesti. Hieman eri aikoihin tapahtuvan täyttymisen voi todeta myös kuvasta 39. Nämä valujärjestelmän toimivuuden kannalta tehdyt huonot valinnat tultaisiin korjaamaan myöhemmin *MAGMA*⁵ -ohjelman optimointi -työkalun avulla ja todistaa siten optimoinnin tehokkuus valujärjestelmän suunnittelussa. Tosin tässäkin valujärjestelmässä täyttyminen

on jo suhteellisen tasapainoinen vaikka valujärjestelmän suunnittelussa siihen ei kiinnitetty erityisesti huomiota. Jakokanavan ollessa sisäänmenojen alapuolella, täyttyy jakokanava ensin kokonaan ennen kuin sula kulkeutuu sisäänmenokanavasta eteenpäin.

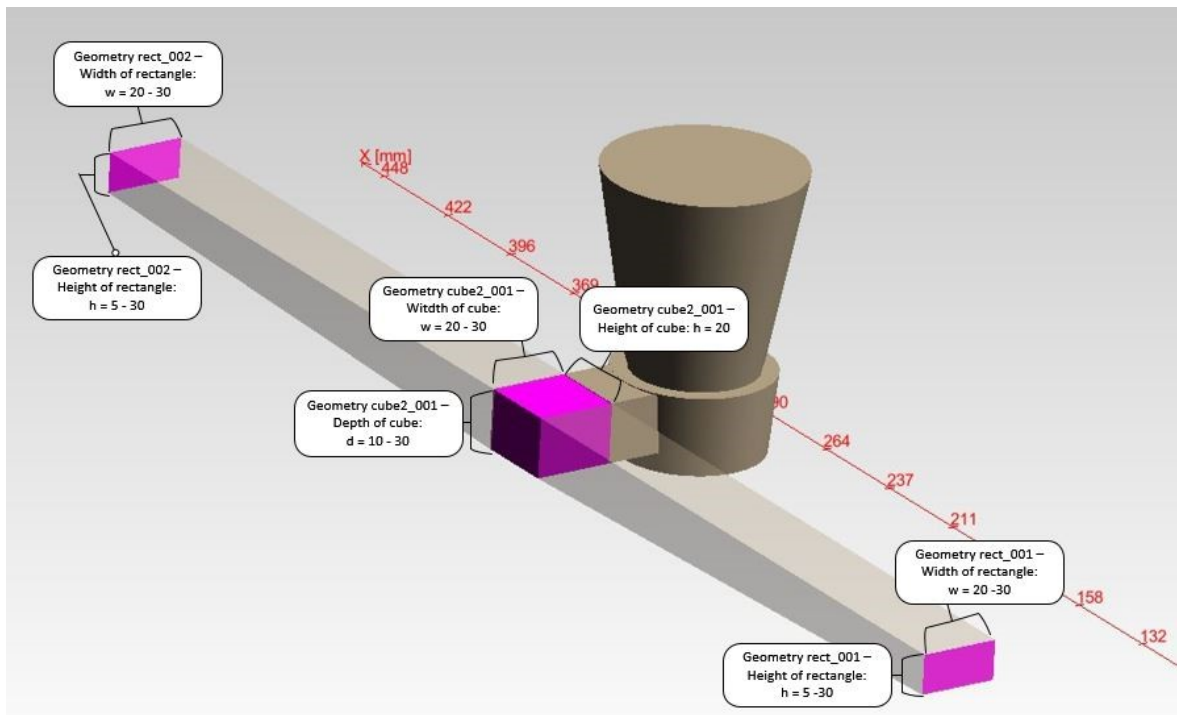
Valujärjestelmä haluttiin optimoida siten, että sulan kulkeutuminen valujärjestelmässä neljän erillisen valutuotteen valuonkaloihin tapahtuu samanaikaisesti. Tällöin jähmettymisen ja jäähtymisen arvot valujärjestelmän erillisillä valutuotteilla ovat mahdollisimman yhtenevät ja olisivat keskenään vertailukelpoisia, mikäli saman valujärjestelmän testivalujen RFID-insertit ovat toisistaan poikkeavia. Pienten seinämäpaksuuksien takia tulisi myös varmistaa valujen täydellinen täyttyminen. Valujärjestelmän optimoinnilla haluttiin tasapainottaa täyttyminen eri valujärjestelmän osille ja välttää epätäydellinen valuonkaloiden täyttyminen. Näiden tavoitteiden toteuttamiseksi päätettiin valujärjestelmän jakokanavan geometriaa optimoida.

Design Variables					
Design Variable	Lower Limit (mm)	Upper Limit (mm)	Step (mm)	Dependency	
<input type="checkbox"/> Geometry rfid_runner_system - transformation - Tr 1: general scale - x	-1.0	-1.0	0.0	<None>	
<input checked="" type="checkbox"/> Geometry rect_001 - Offset first coordinate				120 - {Geometry cube2_001 - Width of cube: w}	
<input checked="" type="checkbox"/> Geometry rect_001 - Offset second coordinate				50 - {Geometry rect_001 - Height of rectangle: h}	
<input checked="" type="checkbox"/> Geometry rect_001 - Offset normal to plane: offset	50.0	80.0	10.0	<None>	
<input checked="" type="checkbox"/> Geometry rect_001 - Width of rectangle: w				{Geometry cube2_001 - Width of cube: w}	
<input checked="" type="checkbox"/> Geometry rect_001 - Height of rectangle: h	5.0	30.0	5.0	<None>	
<input checked="" type="checkbox"/> Geometry rect_002 - Offset first coordinate				120 - {Geometry cube2_001 - Width of cube: w}	
<input checked="" type="checkbox"/> Geometry rect_002 - Offset second coordinate				50 - {Geometry rect_002 - Height of rectangle: h}	
<input checked="" type="checkbox"/> Geometry rect_002 - Offset normal to plane: offset	380.0	410.0	10.0	<None>	
<input checked="" type="checkbox"/> Geometry rect_002 - Width of rectangle: w				{Geometry cube2_001 - Width of cube: w}	
<input checked="" type="checkbox"/> Geometry rect_002 - Height of rectangle: h	5.0	30.0	5.0	<None>	
<input type="checkbox"/> Geometry cube2_001 - Offset normal to plane: offset	0.0	0.0	0.0	<None>	
<input checked="" type="checkbox"/> Geometry cube2_001 - Width of cube: w	20.0	30.0	5.0	<None>	
<input checked="" type="checkbox"/> Geometry cube2_001 - Depth of cube: d	10.0	30.0	5.0	<None>	
<input type="checkbox"/> Geometry cube2_001 - Height of cube: h	20.0	20.0	0.0	<None>	
Design Variable	Lower Limit (°C)	Upper Limit (°C)	Step (°C)	Dependency	
<input type="checkbox"/> Cast Alloy Class - Initial Temperature	730.0	750.0	10.0	<None>	
Design Variable	Lower Limit (s)	Upper Limit (s)	Step (s)	Dependency	
<input type="checkbox"/> Pouring - Pouring Time	3.0	10.0	1.0	<None>	
Design Variable	Lower Limit (°)	Upper Limit (°)	Step (°)	Dependency	
<input type="checkbox"/> Geometry cyl_001 - Cone angle	5.0	5.0	0.0	<None>	
Design Variable	Lower Limit (mm)	Upper Limit (mm)	Step (mm)	Dependency	
<input type="checkbox"/> Geometry cyl_001 - Offset normal to plane: offset	10.0	10.0	0.0	<None>	
<input type="checkbox"/> Geometry cyl_001 - Radius at base: r1	20.0	20.0	0.0	<None>	
<input checked="" type="checkbox"/> Geometry cyl_001 - Height: h				{Geometry cube2_001 - Depth of cube: d} + 5	

Kuva 40. Ensimmäiseen optimointiin määritellyt geometriamuuttujat *MAGMA*⁵-ohjelman Optimization -perspektiivissä. Vain merkityt muuttujat olivat mukana optimoinnissa. Punaisella kehystetyt geometriamuuttujat olivat optimoinnin varsinaisia muuttujia ja sinisellä kehystettyjen muuttujien arvot riippuivat varsinaisten muuttujien arvoista.

Koska stl-tiedostona *MAGMA*⁵-ohjelmaan siirretty 3D pintamalli säilyttää vain jakokanavan kiinteän pintamuodon eikä geometriamuuttujia voitu näin ollen määritellä stl-mallista ollenkaan, mallinnettiin yksinkertaistettu jakokanavan malli suoraan *MAGMA*⁵-ohjelman mallinnustyökaluilla. Tällöin *MAGMA*⁵-ohjelman Geometry -perspektiivissä voitiin määritellä optimointiin mukaan otettavat geometriamuuttujat. Geometriamuuttujiksi eli *MAGMA*⁵ -ohjelmassa Optimization -perspektiivissä määriteltäviksi designmuuttujiksi valittiin lopulta jakokanavan suorakulmion muotoisen poikkileikkauksen mitat ja jakokanavan pituus. Muuttujat määriteltiin vielä erikseen molempiin suuntiin kaatokanavasta, jolloin

poikkileikkaus voi olla jakokanavan toisessa päässä täysin erilainen verrattuna toiseen päähän. Samoin jakokanavan pituus voi poiketa toiseen puoleen verrattuna. Kaikki optimointiin määritellyt muuttujat vaihteluväleineen ja riippuvuuksineen löytyvät kuvasta 40.

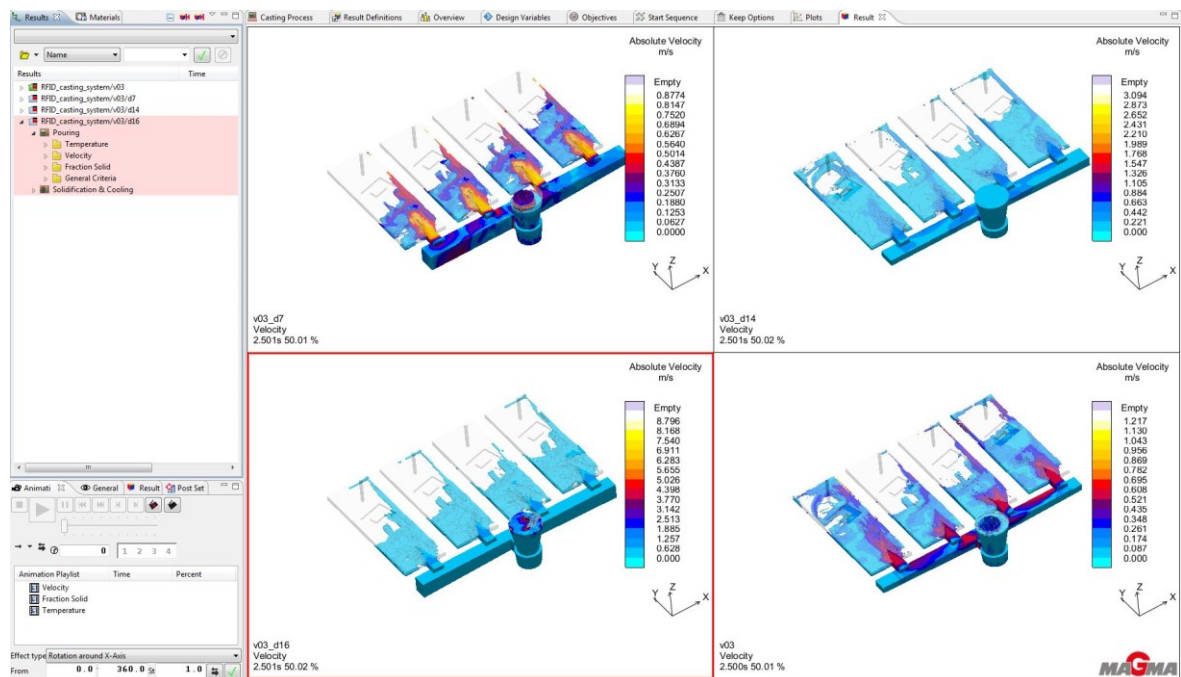


Kuva 41. Osa optimointikierrokseen valituista geometriamuuttujista ja niiden sallitut vaihteluvälit optimoinnissa.

Osa kuvan 40 geometriamuuttujista on merkitty kuvaan 41 jakokanavan rakenteen hahmottamiseksi. Jakokanavan pituutta kahteen suuntaan määrääviä muuttujia *Geometry rect_001 – Offset normal to plane* ja *Geometry rect_002 – Offset normal to plane* ei ole kuvaan 41 merkitty. Pituutta määräävät muuttujat olivat jakokanavan poikkileikkauksien muotoa määränneiden suorakulmiomuotojen paikkojen x-koordinaatteja. Vaihteluväli pituuksille oli 30 mm, jolloin jakokanavan kokonaispituus pystyi vaihtelevaan välillä 300 – 360 mm. Jotta geometriamuuttujat saatiin toimimaan optimoinnissa halutulla tavalla, täytyi jakokanavan poikkileikkausta määränneiden geometrioiden koordinaatit määritellä muuttumaan jakokanavan geometriamuutosten mukaan. Koordinaattien määrittelemättä jättäminen olisi aiheuttanut vääriin suuntiin tapahtuvia muotojen muutoksia. Koordinaattimuuttujia olivat *Geometry rect_001* ja *Geometry rect_002* muuttujiin kuuluvat ja kuvaan 40 merkityt *Offset first coordinate*- ja *Offset second coordinate* -muuttujat. Lisäksi määriteltiin muuttuja *Geometry cyl_001 – Height: h*, joka on kaatokanavan pohjassa olevan sulan epäpuhtauksia erottelevan sylinterimuodon korkeus. Sylinterin korkeuden määriteltiin olevan aina 5 mm enemmän kuin jakokanavan paksuus kaatokanavan kohdalla.

Designmuuttujien määrittelyn jälkeen asetettiin optimoinnin tavoitefunktioiksi tasapainotettu täyttyminen ja epätäydellisen täyttymisen välttäminen. Täyttymisen tuloksia asetettiin tallennettavaksi visuaalisessa muodossa vain lämpötilasta ja sulan nopeuksista, koska suurempi tallennettujen tulosten määrä lisäisi vain optimointiaikaa ja veisi enemmän tallennustilaa. Ensimmäisen simulaatiomallin määrääväksi aloitussekvenssiksi valittiin Sobol,

joka valitsee designmuuttujien arvoja alkaen vaihteluvälin keskivaiheilta edeten koko ajan lähemmäksi vaihteluvälien ääriarvoja. Käytännössä muuttujien vaihteluvälin ääriarvot jäävät yleensä pois optimoinnissa Sobol -asetuksella, koska käyttäjä valitsee aina lopulta itse optimointiin otettavien simulointimallien lukumäärän. Ensimmäiseen optimointikierrokseen otettujen erilaisten simulaatiomallien lukumääräksi valittiin nyt 20 kappaletta. Muuttujille määriteltujen vaihteluvälien ja -suuruuksien perusteella mahdollisia simulaatiomallien designvaihtoehtoja olisi ollut lopulta 8640 erilaista, joten kaikkien vaihtoehtojen simulointi ei olisi ollut edes realistista yhden simulaatiokierroksen viedessä aikaa noin 45 min. Kaiken kaikkiaan 20 erilaisen simulaatiomallin optimointi vei lopulta aikaa 17 tuntia ja 48 minuuttia määritellyillä simulaatiomallin asetuksilla.

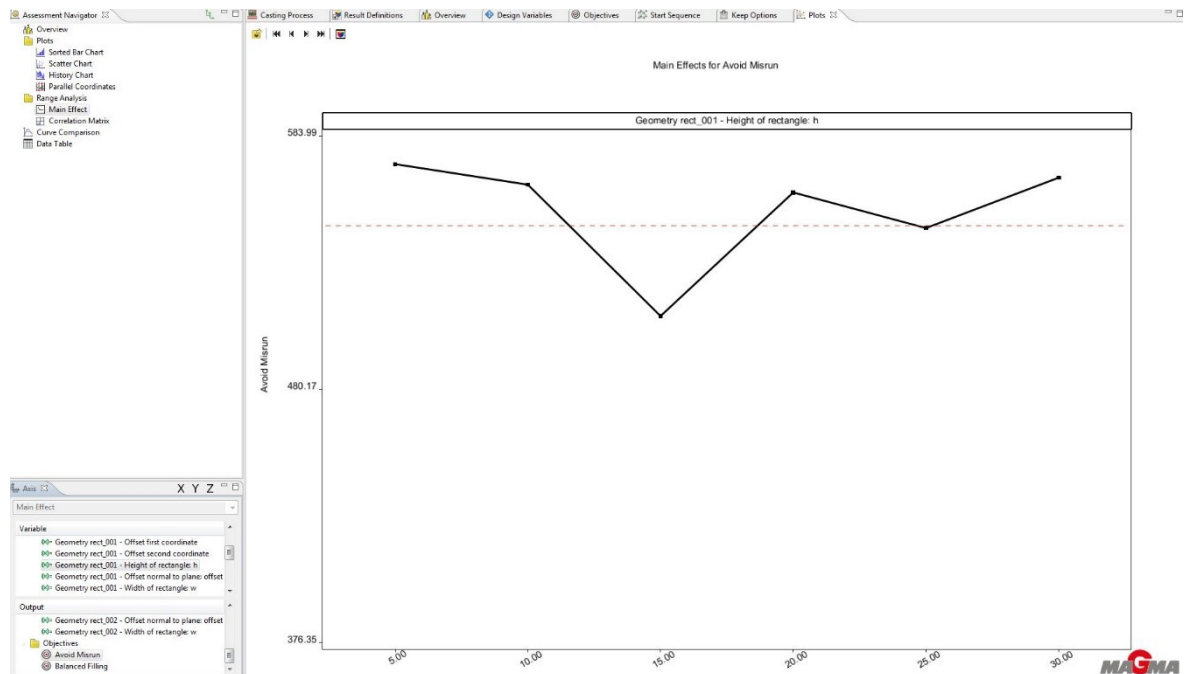


Kuva 42. Optimoinnin tuloksia eri geometriamuuttujien arvoilla. Sulan kulkeutumisessa valuonkaloihin näkyy selvää vaihtelua erilaisilla jakokanavien toteutuksilla.

Optimoinnin tuloksia tarkasteltiin *MAGMA*⁵-ohjelman Assessment -perspektiivissä kaikkien optimoinnin simulaatiomallien valmistuttua. *MAGMA*⁵-ohjelma järjesti automaattisesti kaikki 20 erilaista simulaatiomallia tavoitefunktioiden mukaiseen paremmuusjärjestykseen. Assessment -perspektiivissä määriteltävien kuvaajien avulla pystyi suoraan näkemään geometriamuuttujien erilaisten arvojen vaikutukset optimoinnin tavoitteisiin. Kuvassa 43 näkyy esimerkiksi *Geometry rect_001 – Height of rectangle* -muuttujan vaikutukset valuonkaloiden täyttymisen kannalta. Näiden tulosten perusteella voitiin rajata tai vaihtaa geometriamuuttujien arvoja tarkempaa optimointia varten.

Tasapainotetun täyttymisen kannalta *MAGMA*⁵-ohjelman automaattisesti luotuun paremmuusjärjestykseen ei voinut luottaa, koska tasapainotettuun täyttymiseen vaadittavien erillisten valuonkaloiden määritelmät tehtiin ensimmäisessä optimoinnissa väärin. Käytännössä neljä erillistä valutuotteen onkaloa oli määritelty saman tunnisteiden alle eli *MAGMA*⁵-ohjelma käsitti ne nyt yhtenä samana valuonkalona. Toiseen optimointikierrokseen neljä

erillistä valutuotteen onkaloa saivat jokainen yksilöllisen tunnisteensa, jolloin myös tasapainotetun täyttymisen tulokset näkyivät oikein. Visuaalisesti oli kuitenkin helppoa todeta tasapainoisimmat valujärjestelmät, joten tasapainotetun täyttymisen kannalta edulliset muuttujien arvot voitiin kuitenkin määritellä uudelleenoptimointiin.

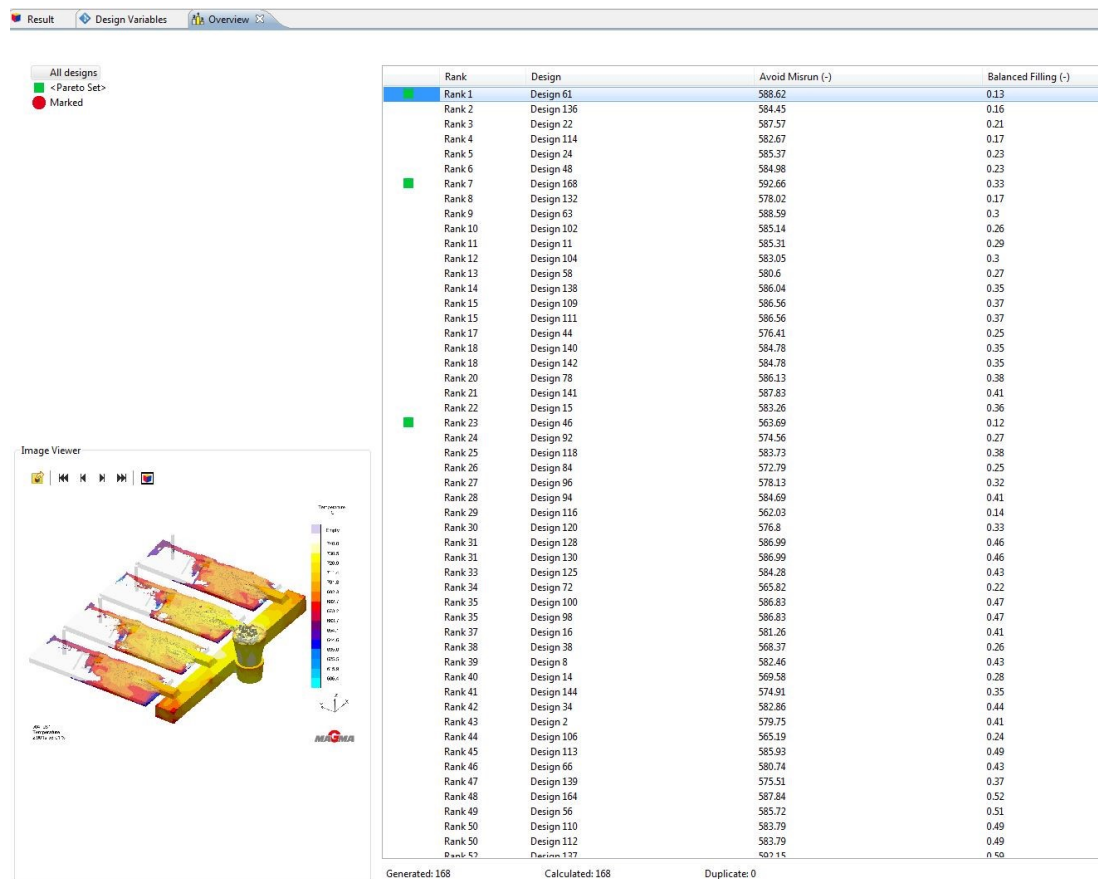


Kuva 43. Geometriamuuttujan arvon vaihtelun vaikutukset valuonkaloiden täyttymisessä.

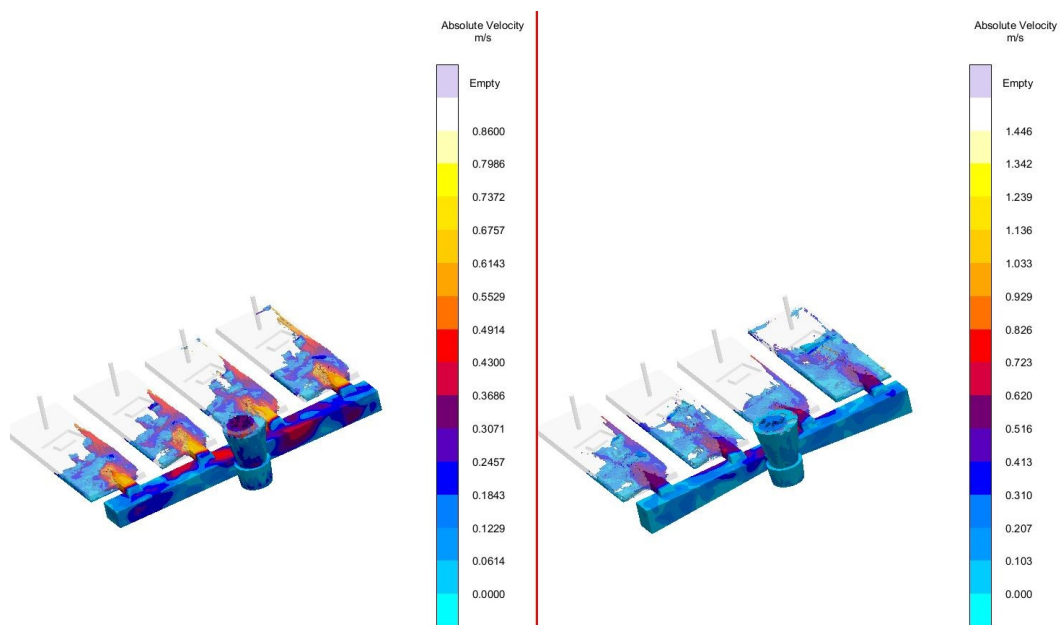
Ensimmäisen optimointikierroksen tulosten perusteella jakokanavan eri suuntiin menevät pituudet vakioitiin ja jakokanavan leveys vakioitiin. Jakokanavan paksuutta eri päissä määrittävien muuttujien muutoshaarukkaa rajattiin ja muutosväliä tiennettiin tarkemmaksi. Yleinen huomio ensimmäisen optimointikierroksen tuloksista oli se, että pinta-alaltaan pienempien poikkileikkausten jakokanavat toimivat yleensä optimoinnin tavoitteiden kannalta epäedullisemmin.

Toisessa optimointikierroksessa erilaisia simulaatiomallivaihtoehtoja tuli yhteensä 168 kappaletta. Määrä lisääntyi yleensä radikaalisti yhdelläkin lisämuuttujalla. Koska pääasiallisena tarkoituksena oli testata MAGMA⁵-ohjelman optimointityökalun suorituskykyä, käytettiin aloitussekvenssinä nyt asetusta Full Factorial eli optimointiin otettiin mukaan kaikki 168 erilaista jakokanavan designvaihtoehtoa. Käytännössä tämä tarkoitti optimoinnin käytössä olleen tietokoneen teholla 5 vuorokauden ja 12 tunnin yhtämittaista simulaatiomallien laskentaa ja noin 80 gigabittiä uutta simulaatiodataa.

Uudelleenoptimoinnin tuloksia näkyy kuvissa 44 ja 45. Lopulliseksi jakokanavan designiksi valittiin MAGMA⁵-ohjelman ehdottama designmalli, joka näkyy kuvassa 45 vasemmalla. Jakokanava kapenee valitussa mallissa lievästi vasempaan suuntaan. Tasapainotetun täyttymisen kannalta olisi löytynyt parempiakin designvaihtoehtoja, mutta tässä mallissa vältetään myös epätäydelliseltä täyttymiseltä parhaiten.

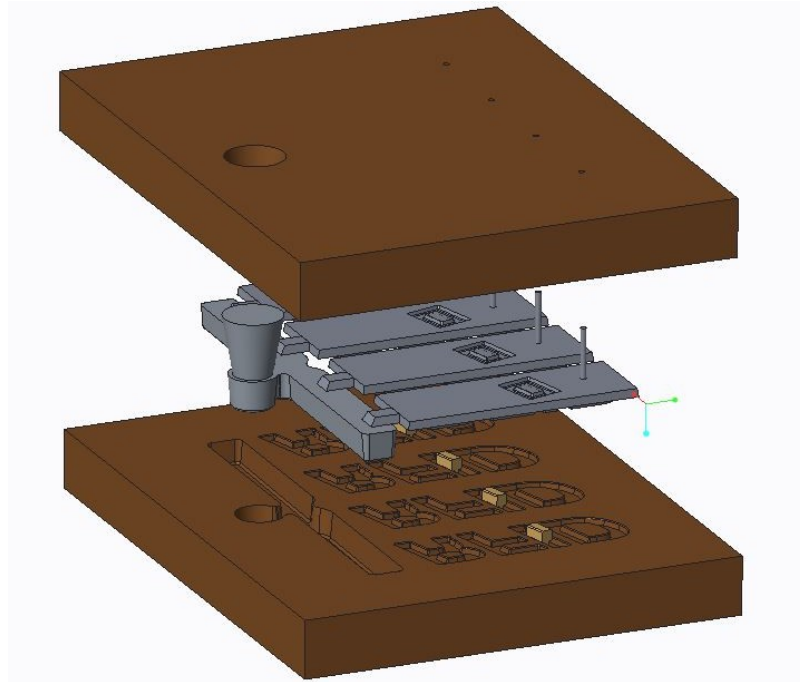


Kuva 44. Uudelleenoptimoinnin overview -näkömäge Assessment -perspektiivissä. Vasemman alakulman aktivoitu simulaatiomalli on *MAGMA*⁵ -ohjelman ehdottama simulaatiomalli, jolla on parhaimmat optimoinnissa tavoitellut ominaisuudet.



Kuva 45. Uudelleenoptimoinnin tuloksia. Vasemmalla *MAGMA*⁵ -ohjelman ehdottama parhain valujärjestelmädesign, jonka jakokanava kapenee hieman vasemmalle mentäessä ja oikealla huonoin design, jonka jakokanava laajenee molempiin päihin.

Optimointitulosten perusteella mallinnettiin optimointimallin mukainen jakokanava valujärjestelmälle. Valujärjestelmän osien perusteella voitiin helposti mallintaa myös muottien lopulliset geometriat, jotka näkyvät kuvassa 46.



Kuva 46. Optimoinnin perusteella mallinnetun valujärjestelmän lopullinen toteutustapa. Kuvassa RFID-insertit ovat asennettuna hiekkamuottiin, kuten tulisi tehdä ennen muottien yhdistämistä ja sulan alumiinin kaatamista valujärjestelmään.

Valmiiden muottien perusteella mallinnettiin ylä- ja alamuotille omat valumallit, joita käytettäisiin myöhemmin hiekkakaavaukseen. 3D-mallit lähetettiin koneistettaviksi ja valmiiksi koneistetut valumallit näkyvät kuvassa 47.

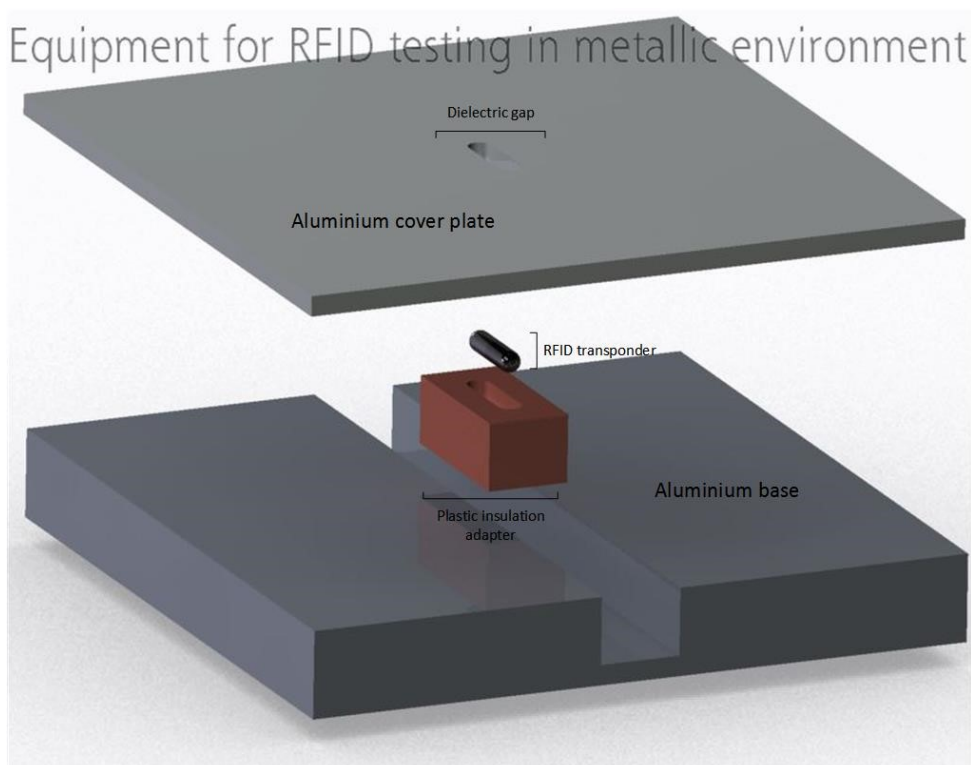


Kuva 47. Koevalua varten valmistetut valumallit, joissa optimoitu valujärjestelmä.

5.1.4. RFID-tunnisteiden toiminta metalliympäristössä

Ennen koevaluja suunniteltiin testata tilattujen RFID-tagien suorituskkyä metallisessa ympäristössä. Päätaavoitteena oli todentaa RFID-tagien toiminta koevaluuotetta vastaavassa ympäristössä ilman valussa syntyvää lämpökuormitusta, jotta tiedettäisiin perusedellytykset RFID-tagien toiminnalle alumiinisen valutuotteen sisällä. Tilattujen RFID-tagien valaminen metallin sisään olisi ylipäättään täysin turhaa vaikka tagit säilyisivätkin valusta ehjänä, jos ne eivät kuitenkaan toimisi vastaavassa ympäristössä.

Testausta varten suunniteltiin kuvaa 48 vastaava modulaarinen testijärjestelmä, jossa dielektrisen raon ja RFID-kapselin kokoa voisi helposti vaihdella. Lisäksi RFID-kapselin paikkaa suhteessa dielektriseen rakoon voisi muuttaa raon suuntaisesti.



Kuva 48. Suunniteltu testijärjestelmä RFID-tagien testaukseen.

Suunnitelman perusteella valmistettiin kuvan 50 mukainen testijärjestelmä, jonka alumiinisesta kansilevystä löytyy neljä erilaista rakoa RFID-tagien testaukseen. Raot ovat pituuksiltaan 13 ja 22 mm, ja molemmille pituuksille löytyy raot leveysiltään 2 ja 3 mm. RFID-tagien toimintaa testijärjestelmässä testattiin avonaisen 3D-tulostetun PLA-pidikkeen avulla sekä valmistetuilla Teflon -inserteillä, joista paikoitusosa oli poistettu. Referenssiksi testattiin ensin tilattujen RFID-tagien toiminta ilman metalliympäristön vaikutusta sekä erilaisten metalliseosten pinnoilla absorptiokalvon kanssa ja ilman absorptiokalvoa. Erilaisten metallipintojen vaikutusta testattiin myös erilaisiin näytteihin saatuihin RFID-tunnistetarroihin ja -levyihin. Taulukkoon 9 on lisätty 13,56 MHz:n taajuusalueella toimivien RFID-tagien lukuetaisyyskysiä erilaisilla materiaalipinnoilla.

Taulukko 9. Kokeellisesti testattuja 13,56 MHz:n taajuusalueen lukuetaisyyksiä metraTec DeskID ISO RFID Desktop -RFID-lukijalla erilaisilla pinnoilla.

RFID-tunnistetyyppi	HID Glass Tag I-Code kapseli 4x22 mm	iMini Tag, pyöreä nappi 1x6,2 mm	Näyte: Tarra, suorakulmio 85x55 mm	Näyte: Tarra, neliö 45x45 mm	Näyte: Tarra, pyöreä Ø30 mm	Näyte: Pyöreä nappi, 2,5x15 mm	Näyte: Pyöreä nappi, 2,5x20 mm	Näyte: Pyöreä nappi, 2,5x30 mm
REFE-RENSSI (puu)	4cm(/5cm ¹)	1,5 cm	15 cm	7 cm	6 cm	4 cm	7 cm	9 cm
REFE-RENSSI (puu) ²	3 cm	1 cm	5 cm	3 cm	4 cm	2,5 cm	2,5 cm	4,5 cm
Alumiinipinta	3,5cm(/4cm ¹)	Ei lukua	Ei lukua (/1,5 cm) ⁴	Ei lukua	Ei lukua	Ei lukua	Ei lukua	Ei lukua
Alumiinipinta ²	3 cm	Ei lukua ³	5 cm	3 cm	4 cm	2,5 cm	2 cm	5,5 cm
Kuparipinta	2,5cm (/3,5cm ¹)	Ei lukua	Ei lukua	Ei lukua	Ei lukua	Ei lukua	Ei lukua	Ei lukua
Kuparipinta ²	2 cm	Ei lukua	5,5 cm	3 cm	4 cm	2,5 cm	2 cm	6 cm
Teräspinta	2,5cm (/3,5cm ¹)	Ei lukua	Ei lukua	Ei lukua	Ei lukua	Ei lukua	Ei lukua	Ei lukua ³
Teräspinta ²	2 cm	Ei lukua ³	5,5 cm	2 cm	2 cm	1 cm	2 cm	5,5 cm

¹RFID-transponderi asennettuna Teflon -insertin sisälle.

²Paksuudeltaan 0,18 millimetrin absorptiokalvo lisättynä RFID-tagin ja materiaalin väliin.

³Tiettyssä lukijan asennossa lukeminen saattanut toimia hetkellisesti

⁴Materiaalin ja RFID-tagin välissä 1-2 mm ilmarako



Kuva 49. Taulukon 9 testeissä mukana olleet RFID-tagit ja testeissä käytössä ollut kuparilevy. Mustat liuskat RFID-tagien alla olivat käytössä olleita absorptiokalvoja.

13,56 MHz:n RFID-tageille tehtyjen lukuetaisyydestien perusteella voitiin heti todeta, että metallisella pinnalla ja absorptiokalvon käytöllä on merkittävä vaikutus RFID-tagien lukemisen onnistumisessa. Tilatun pyöreän napinmuotoisen RFID-tagin lukeminen hankitulla RFID-lukijalla ei esimerkiksi onnistunut metallipinnoilta ollenkaan, vaikka kyseisestä RFID-tagista löytyi jo valmiiksi integroituna lukemista helpottava absorptiomateriaalikerros. Toisaalta kyseisen RFID-tagin lukeminen metallipinnoilta onnistui taas älypuhelimien NFC-lukijoilla, jotka toimivat samalla taajuualueella. Lukeminen onnistui ainakin Lumia 925 ja Lumia 950 -puhelimilla, kun puhelin oli asetettu lähes kiinni RFID-tagiin. Erillisen absorptiokalvon lisääminen vielä paransi lukemisen onnistumisen todennäköisyyttä.

Mahdollisesti valunsisäiseen tunnistukseen soveltuvan kapselinmuotoisen RFID-tagin suorituskyvyn testaamista jatkettiin vielä valmistetun testijärjestelmän avulla. Testien tulokset näkyvät taulukossa 10.

Taulukko 10. Kuvan 50 testijärjestelmällä testattuja 13,56 MHz:n taajuualueen lukuetaisyyksiä RFID-kapselille alumiinisen kansilevyn pinnasta metraTec DeskID ISO RFID Desktop -RFID-lukijalla. Alumiinisen kansilevyn paksuus oli 3 mm.

RFID-tunnistetyyppi	HID Glass Tag I-Code SLIX, kapseli 4x22 mm
Kokonaan alumiinin sisällä, 3x22 mm rako, teflon insertti(RFID-tagin etäisyys mitatusta pinnasta ~6mm)	1 cm
Kokonaan alumiinin sisällä, 3x22 mm rako, teflon insertti + absorptiokalvo(RFID-tagin etäisyys mitatusta pinnasta ~6mm)	0,5 cm
Pelkkä kansilevy, 2x22 mm rako(RFID-tagin etäisyys mitatusta pinnasta ~3mm)	1,5 cm
Pelkkä kansilevy, 3x22 mm rako(RFID-tagin etäisyys mitatusta pinnasta ~3mm)	¹ 1,5 cm
Pelkkä kansilevy, 2x13 mm rako(RFID-tagin etäisyys mitatusta pinnasta ~3mm)	² 1,5 cm
Pelkkä kansilevy, 3x13 mm rako(RFID-tagin etäisyys mitatusta pinnasta ~3mm)	² 1,5 cm

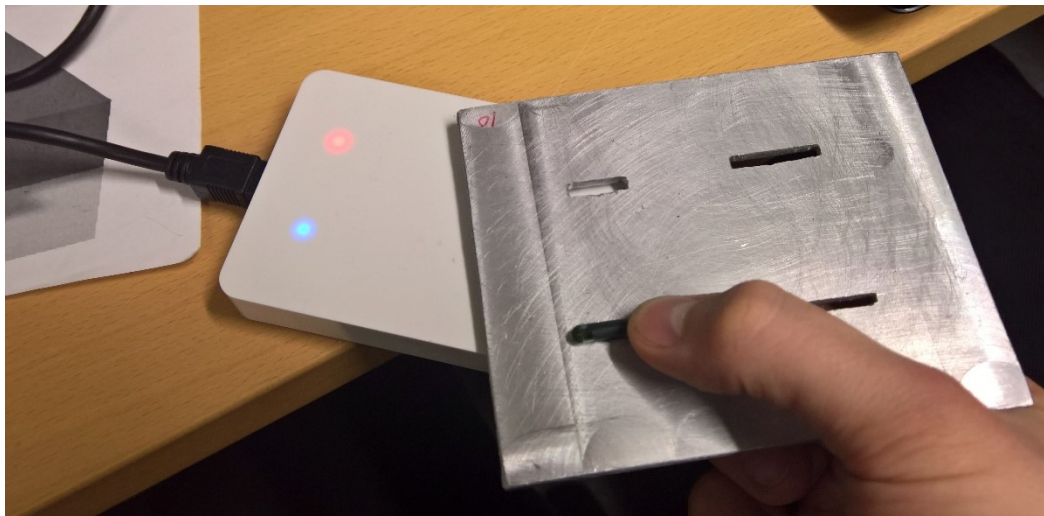
¹RFID-tagin lukeminen onnistui lievästi helpommin verrattuna leveydeltään 2 mm rako.

²Raon pituuteen nähden suuremman RFID-tagin lukeminen onnistui, kun RFID-tagin oli asetettu pituussuunnassa symmetrisesti keskelle rakoa. Lukeminen ei onnistunut, jos vain toinen puoli kapselinmuotoisesta RFID-tagista näkyi raosta.



Kuva 50. Valmistettu testijärjestelmä RFID-tagin valunsisäisen suorituskyvyn todentamiseksi.

Kapselinmuotoiselle ja 13,56 MHz:n taajuusalueella toimivalle RFID-transponderille tehtyjen testien perusteella voitiin todeta, että kyseinen RFID-tagi olisi luettavissa metallin sisältä noin 1,5 cm etäisyydeltä, kun tarvittavan kokoinen dielektrinen rako löytyy ja RFID-transponderi on rakoon nähden sopivasti sijoittuneena. Dielektrinen rako voisi olla kapselinmuotoiseen RFID-transponderiin verrattuna myös kooltaan pienempi, mutta lukemisen todennäköisyys paranee, mitä suurempi on raon leveys. Testeissä käytettiin 3 mm paksua alumiinilevyä, mutta koevaluihin suunniteltu vastaava materiaalikerros olisi vain yhden millimetrin, joten lukemisen onnistuminen koevalusta olisi näin ehkä todennäköisempää kuin testeissä. Koevaluja varten suunniteltujen RFID-inserttien paikoitusosan paksuutena toimisi ainakin kapselin oma leveys ja paikoitusosan pituus voisi tarvittaessa olla kapselin pituutta lyhyempikin, kunhan RFID-kapseli on asennettu pituussuunnassa symmetrisesti paikoitusosan keskelle.



Kuva 51. 22 millimetrin pituisen RFID-transponderin lukeminen 13 millimetriä pitkän ja 2 millimetriä leveän alumiinilevyssä olevan raon läpi. Lukeminen onnistui vain, kun RFID-transponderi oli asetettu raon suuntaisesti symmetrisesti raon keskelle. Sininen valo kuvan valkoisessa RFID-lukijassa indikoi onnistunutta RFID-tunnisteen lukua.

Kapselinmuotoinen RFID-transponderi oli 13,56 MHz:n taajuusalueen testien RFID-tunnistetyypeistä ainoa, jonka lukeminen metallipinnoilta onnistui ilman erillistä absorptiokalvoa. Tämä selittynee kapselin antennikonstruktion sisään integroidulla absorptioytimellä. Erillisen absorptiokalvon lisääminen kapselinmuotoisen RFID-transponderin taustalle itseasiassa vain alensi lukuetaisyyttä. Teflon-insertin sisällä olevan RFID-kapselin ei huomattu vaikuttavan lukuetaisyyksiin. Testien mukaan lukuetaisyys 13,56 MHz:n RFID-transponderille olisi ollut jopa marginaalisesti parempi tefloneristettynä, mutta tulokset saattavat johtua täysin mittavirheestä tai suojaamaton RFID-kapseli on voinut ottaa enemmän häiriötä käsin pidettäessä.

13,56 MHz:n taajuusalueen RFID-tageille tehdyissä testeissä huomioitavaa oli, että suuremmalla RFID-tagin antennikonstruktion halkaisijalla lukeminen onnistui yleisesti kauempaa. Absorptionkalvon lisääminen RFID-tagin alle heikensi lukuetaisyyttä yleensä merkittävästi

ja hieman odotusten vastaisesti, jos RFID-tunniste ei ollut metallisen ympäristön vaikutuksen alaisena. Toisaalta useimmissa tapauksissa lukeminen metallipinnoilta ei onnistunut ollenkaan ilman erillistä absorptiokalvoa. Lukuetaisyys absorptiokalvon kanssa säilyi suurin piirtein samana riippumatta siitä oliko RFID-tagin asennettuna metalliseen tai puiseen pintaan. Testien aikana huomattiin myös, että pienikin ilmarako metallisen pinnan ja RFID-tagin välillä saattoi mahdollistaa RFID-tagin lukemisen ilman absorptiokalvoa. Kokoluokaltaan pienempien RFID-tagien lukemiseen vaikutti myös paljon RFID-tagin paikka RFID-lukijaan nähden. RFID-lukijassa oli selvästi alueita, joissa lukeminen onnistui todennäköisemmin ja mahdollisesti myös kauempaa. Esimerkiksi kuvan 51 perusteella voi huomata yhden tällaisen alueen olevan aivan suorakulmion muotoisen RFID-lukijan kulmassa.

Eri metalliseoksilla ei taas huomattu olevan suurta vaikutusta lukuetaisyyksiin 13,56 MHz:n taajuusalueen RFID-tageissa. Teräksisellä pinnalla lukuetaisyydet näyttivät olevan marginaalisesti heikommat, mutta käsivaralla mitattujen lukuetaisyyksien perusteella ei suoraa johtopäätöstä asiasta voitu tehdä, kun mittatarkkuus testeissä oli noin 0,5 cm luokkaa. Lisäksi käytössä ollut pöytäkäyttöön tarkoitettu RFID-lukija jumittui usein liikuteltaessa vaatien uudelleen alustamisen, mikä teki testien suorittamisesta hankalampaa ja enemmän aikaa vievää.

Kun alemman taajuusalueen RFID-lukija saatiin käyttökuntoon, tehtiin vastaavat lukuetaisyyksien perustestaukset myös alemman taajuusalueen RFID-tageille. Taulukkoon 11 on lisätty 125 – 135 kHz:n taajuusalueella toimivien RFID-tagien lukuetaisyyksiä erilaisilla materiaalinpinnoilla. Taulukon 11 tulosten perusteella voidaan edelleen todeta metallisen ympäristön heikentävän yleisesti RFID-tagien lukuetaisyyksiä. Kokoluokaltaan suurimman kapselinmuotoisen RFID-transponderin lukuetaisyyksiä ei voitu taulukkoon 11 lisätä, koska hankittu RFID-lukija ei tukenut kyseistä RFID-transponderimallia ollenkaan.

Taulukon 11 tuloksia tarkastelemalla voitiin todeta, ettei absorptiokalvon käyttäminen kapselin muotoisissa transpondereissa ole hyödyllistä oikeastaan missään tilanteessa, koska lukuetaisyydet erillistä absorptiokalvoa käyttämällä yleisesti vain heikentyvät. Toisaalta RFID-tageissa, joissa ei ollut omaa sisäistä absorptioidintä, lukeminen metallipinnoilta mahdollistui yleensä vain erillistä absorptiokalvoa käyttämällä.

Alemman taajuusalueen RFID-transpondereilla oli hieman enemmän vaihtelua lukuetaisyyksissä riippuen transponderin koosta ja käytetystä metalliympäristöstä verrattuna korkeamman taajuusalueen testeihin vaikka lukuetaisyydet olivat muuten huomattavasti lyhyempiä johtuen alemman taajuusalueen rajoituksista ja mahdollisesti myös lukuteholtaan heikomman RFID-lukijan vuoksi. Tuloksien perusteella vaikuttaisi myös, että pienikin taajuusalueen vaihtelu vaikuttaisi merkittävästi RFID-transponderin ominaisuuksiin ja nyt myös erilaisilla metallipinnoilla vaikuttaisi olevan enemmän merkitystä. Tästä esimerkkinä kokoluokaltaan pienimmän transponderimallin lukuetaisyydet, jotka taulukon 11 mukaan ovat heikoimmat silloin kuin metallinen ympäristö ei ole vaikuttamassa ja kun kyseessä on kuparinen- tai alumiininen pinta, mutta lukuetaisyys olisi kuitenkin vertailun parhain, kun käyttöympäristönä on teräspinta.

Taulukko 11. Kokeellisesti testattuja 125 - 135 kHz:n taajuusalueen lukuetaisyyksiä erilaisilla RFID-transpondereilla iDRONIC:in USB Stick Reader EVO -RFID-lukijalla erilaisilla pinnoilla.

RFID-tunnistetyyppi	HID Glass Tag EM 4305(Increased range), Kapseli: 2,12x9 mm	Glass Tag Hitag S256, Kapseli: 2,12x12 mm	Glass Tag Hitag S256, Kapseli: 3,15x13,3 mm	Glass Tag Hitag S2048, Kapseli: 3,15x13,3 mm	TI Glass Transponder, Kapseli: 3,9x32 mm	Näyte: Pyöreä nappi, 1,5x12 mm
REFE-RENSSI (puu)	1,5cm (/1 cm ¹)	2cm (/1,5cm ¹)	2,5cm (/2cm ¹)	2cm(/2cm ¹)	Ei lukua	2 cm
REFE-RENSSI (puu)²	1,5 cm	Ei lukua	1 cm	Ei lukua	Ei lukua	2 cm
Alumiinipinta	1 cm	1,7 cm	2 cm	2 cm	Ei lukua	0,1 cm
Alumiinipinta²	1 cm	0,5 cm	1,6 cm	0,8 cm	Ei lukua	0,2 cm
Kupari-pinta	1 cm	1,7 cm	1,5 cm	2 cm	Ei lukua	0,1 cm
Kupari-pinta²	1,3 cm	0,8 cm	1,7 cm	1,2 cm	Ei lukua	0,9 cm
Teräs-pinta	1,8 cm	1 cm	1,7 cm	1,4 cm	Ei lukua	0,5 cm
Teräs-pinta²	1,2 cm	0,5 cm	1,5 cm	0,8 cm	Ei lukua	0,6 cm

¹RFID-transponderi asennettuna Teflon -insertin sisälle.

²Paksuudeltaan 0,18 millimetrin absorptiokalvo lisättynä RFID-tagin ja materiaalin väliin.

³Tiettyssä lukijan asennossa lukeminen saattanut toimia hetkellisesti

Valunsisäistä RFID-tunnistetta ajatellen parhaimmat ominaisuudet olivat 13,3 millimetriä pitkällä kapselinmuotoisilla RFID-transpondereilla, joita voidaan muutenkin pitää kapselinmuotoisten RFID-transponderien perusmalleina. Näistä vielä erikseen lukeminen onnistui parhaiten pienemmän muistikapasiteetin omaavalla kapselimallilla vaikka muuten nämä RFID-transponderimallit olivat täysin vastaavia. Heikoimmat ominaisuudet valunsisäiseen tunnistukseen oli 12 mm pitkällä transponderimallilla, jonka lukeminen ei onnistunut metallin sisältä ollenkaan. Pienimmän kokoluokan kapselimallin lukeminen onnistui, kun lukija oli transponderiin nähden hyvin sijoitettuna ja ehkä oudosti myös erillisen absorptiokalvon käytöllä vaikutti olevan nyt hyötyä. RFID-transponderien lukuetaisyyksien tuloksia metallin sisältä erillisen testijärjestelmän avulla on listattuna taulukkoon 12. Alemman taajuusalueen RFID-transpondereita pitäisi siis yhtä mallia lukuun ottamatta saada juuri ja juuri luetua myös koevalukappaleiden konstruktioista hankitun RFID-lukijan avulla.

Taulukko 12. Kuvan 50 testijärjestemällä testattuja 125 – 135 kHz:n taajuusalueen lukuetaisyyksiä RFID-kapselille alumiinisen kansilevyn pinnasta iDTRONIC:in USB Stick Reader EVO -RFID-lukijalla. Alumiinisen kansilevyn paksuus oli 3 mm.

RFID-tunnistetyyppi	HID Glass Tag EM 4305(Increased range), Kapseli: 2,12x9 mm	Glass Tag Hitag S256, Kapseli: 2,12x12 mm	Glass Tag Hitag S256, Kapseli: 3,15x13,3 mm	Glass Tag Hitag S2048, Kapseli: 3,15x13,3 mm
Kokonaan alumiinin sisällä, 3x13 mm rako(RFID-tagin etäisyys mitatusta pinnasta ~4mm)	Ei lukua(/~0,5cm) ¹	Ei lukua	~1 cm	~0,5 cm
Kokonaan alumiinin sisällä, 3x13 mm rako + Teflon -insertti(RFID-tagin etäisyys mitatusta pinnasta ~6mm)	Ei testattu	Ei testattu	Ei lukua/~0,5 cm	Ei lukua/~0,3 cm
Pelkkä kansilevy, 2x13 mm rako(RFID-tagin etäisyys mitatusta pinnasta ~3mm)	Ei lukua	Ei lukua	~1 cm	~0,5 cm
Pelkkä kansilevy, 3x13 mm rako(RFID-tagin etäisyys mitatusta pinnasta ~3mm)	Ei lukua(/~0,5cm) ²	Ei lukua	~1 cm	~0,5 cm

¹Paksuudeltaan 0,18 millimetrin absorptiokalvo lisättynä RFID-tagin ja materiaalin väliin.

²Lukeminen mahdollistui transponderin ollessa alle 3 mm metalliin upotettuna.

5.1.5. 1. Koevalu

Ensimmäistä koevalua varten kaavattiin hiekkamuotit kolmelle valujärjestelmälle. Ilmakanavistot ja kaatokanavat porattiin muotteihin hiekkakaavauksen jälkeen. Erikokoisia teflon -inserttejä varten jouduttiin myös raaputtamaan hiekkaa pois osasta inserteille kaavattuja paikkoja. Kaavattuja hiekkamuotteja näkyy kuvassa 52, joissa teflon -insertit ja muottien paikoitustapit ovat valmiiksi asennettuna. Muottien kokoonpanot kokonaisuudessaan näkyvät kuvassa 53, jossa alumiinivalut on jo tehty.



Kuva 52. Kaavattuja hiekkamuotteja. Telfon -insertit ja paikoitustapit kuvissa valmiiksi asennettuna.

Yksi kaavatuista hiekkamuoteista tehtiin sinkkivaluna, jotta voitaisiin vertailla Teflon -inserttien kestävyyttä huomattavasti alemman lämpötilan valuissa. Koevaluissa sinkin valulämpötila oli noin 480 °C ja alumiinin noin 740 °C.



Kuva 53. Lopullisiin muottikokoonpanoihin lisättiin vielä sulan metallin kaatamista helpottavat kaatoaltaat erillisillä hiekkalieriöillä, jotka yhdistettiin muottikokoonpanoihin keernaliiman avulla. Kuvassa alumiini on jo kaadettu muotteihin.

Valamisen jälkeen muotit purettiin ja valuissa olleiden Teflon -inserttien kunto tarkastettiin. Teflon -insertit olivat säilyneet alumiinivaluissa yllättävänkin hyvässä kunnossa ja olivat pintaosiltaan palaneet vain hyvin vähän. Yli kaksisataa astetta alemmassa valulämpötilassa valetussa sinkkivalussa Teflon -insertit olivat säilyneet vieläkin paremmin eikä palamisjälkiä näkynyt oikeastaan ollenkaan.



Kuva 54. Alumiinivalut heti alamuotin irrottamisen jälkeen. Teflon -inserttien paikoitusosat ovat säilyneet suhteellisen hyväkuntoisina valusta.

Alumiinivaluissa sulaneen Teflonin huomattiin tuottaneen valujen pintaan muottihiekan ja sulaneen Teflonin seosta, joka näkyy valuissa tummentumina inserttien ympärillä. Tarkemmissa tarkasteluissa huomattiin myös, että osa Teflon -inserttien pintakerroksista olivat hieman haurastuneet suurien lämpökuormien johdosta ja pieniä paloja pystyi osasta inserttejä käsin irrottamaan.

Teflonin mihinkään tarttumattoman ominaispiirteen ja sulaneen materiaalin johdosta, insertit olivat alumiinin sisällä hieman väljästi irrallaan. Sinkkivalussa, jossa Teflonin palamista ei ollut havaittavissa, Teflon -insertit pysyivät tiukemmin kiinni ja valut olivat insertin ympäriltä muutenkin siistimmän näköiset.

Valujen täyttyminen inserttien ympärillä oli jäänyt hieman vajaaksi useiden valujen kohdalla, mutta paremmin täyttyneitäkin valuja löytyi. Epätäydellinen täyttyminen on johtunut insertin ympärillä olleesta liian pienestä materiaalivahvuudesta, joka oli alimmillaan vain yhden millimetrin. Varsinkin koevaluissa käytetyt kokoluokaltaan suurempien inserttien valutuotteet olivat aina jääneet hieman vajaiksi, koska ohuemman materiaalivahvuuden kohdalla oli näissä valuissa enemmän. Yksityiskohtaisempia esimerkkitapauksia näkyy kuvassa 55.



**Kuva 55. Teflon -insertit sinkki- ja alumiinivaluissa. Ylimpänä sinkkivalu, jonka täyttyminen on jäänyt va-
jaaksi suurikokoisen insertin ympärillä. Keskellä alumiinivalu, jossa havaittavissa teflonin palamisesta
johtuvia tummentumia insertin ympärillä. Alimpana sinkkivalu, joka on täyttynyt lähes täydellisesti teflon
-insertin ympärille eikä palamisjälkiä ole havaittavissa.**

Yleisen tarkastelun jälkeen kaikki valutuotteet irrotettiin erilleen valujärjestelmistään ja purseet poistettiin. Parhaiten onnistuneet valut vielä viimeisteltiin hiomalla. Alumiinikap-
paleissa olleiden Teflon -inserttien ympärille ujutettiin kirkasta epoksiliimaa väljyyden pois-
tamiseksi. Kiinteänä osana alumiinikappaletta ne myös näyttivät siistimmiltä hionnan jäl-
keen.

Kun koevalun kaikki kappaleet olivat erillään ja Teflon -inserttien paikoitusosat oli poistettu,
testattiin olivatko Teflon -inserttien sisällä olleet RFID-transponderit säilyneet valuissa eh-
jinä. Koevaluissa käytettyjä erilaisia inserttejä oli kahta eri peruskokoa 2,12x9 mm;
3,15x13,3 mm ja 4x22 mm kokoisille RFID-transpondereille. Pienin 2,12x9 mm -kokoinen
transponderi asennettiin 3,15x13,3 mm -kokoisen transponderin inserttiaihiin (kuva 32),
jolloin transponderin ympärille jäänyt eristävä materiaalikerros oli näin hieman suurempi
pienimmälle 1. koevalun transponderimallille. Suurin koevaluissa käytetty RFID-trans-
ponderimalli, 4x22 mm, vaati 10 millimetriä pidemmän inserttiaihiin. Osalle koevalujen in-
serteistä jätettiin suunniteltua paksumpi paikoitusosa, jotta nähtäisiin myös paremmin ko-
koluokiltaan erikokoisten dielektristen rakojen toimivuus valuissa.

Koevalukappaleet, joihin oli asennettu 13,56 MHz:n taajuusalueen RFID-tunnisteet, eivät reagoineet enää RFID-lukijan kanssa. Tunnisteet eivät reagoineet alumiinisessa eivätkä sinkkivaletussakaan valukappaleessa. 13,56 MHz:n RFID-tunnisteet olivat koevalun suurikokoisimmat eli kokoluokaltaan 4x22 mm. Alemman taajuusalueen koevalukappaleet eivät myöskään reagoineet mitenkään lukuyrityksiin.

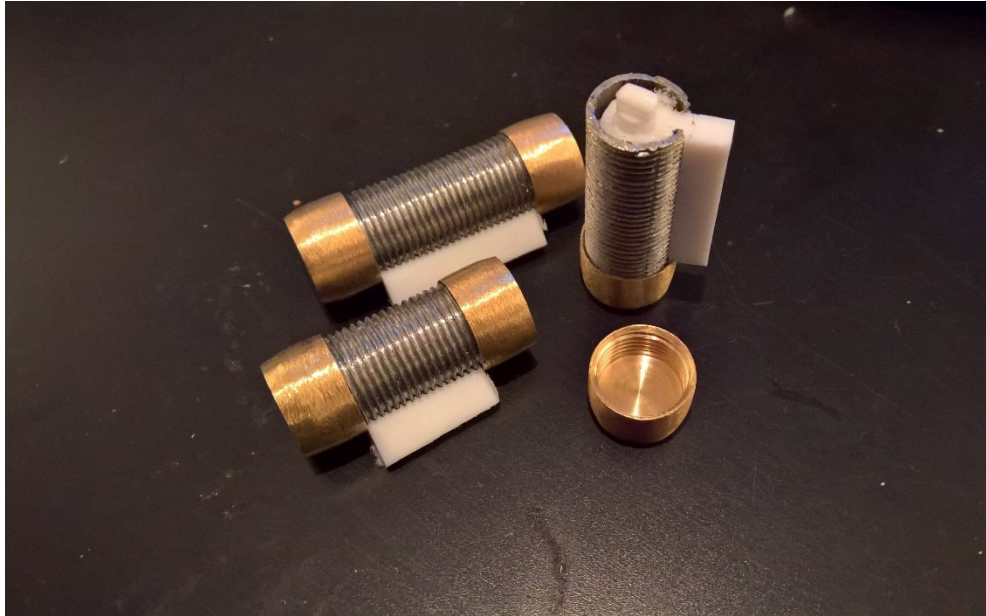
RFID -insertti leikattiin irti yhdestä valukappaleesta, jotta voitaisiin tarkemmin määrittää RFID-transponderien hajoamisiin johtanut pääsyy. Vian määrittämiseksi RFID-transponderi kaivettiin vähitellen ulos Teflon -insertistä. Koska RFID-kapselin lasinen kuori oli säilynyt täysin ehjänä, oli transponderin hajoaminen johtunut kokonaan RFID-transponderiin johtuneesta lämmöstä valun aikana. Lisäksi transponderin lasin läpi tarkasteltuna, transponderin sisällä ollut tumma sideaine oli levinnyt lämmön johdosta koko transponderin alalle peittäen kaiken alleen, kun normaalisti transponderin toisesta päästä pystyisi erottamaan osan antennikonstruktiosta. Jos RFID-transponderin lasinen kuori olisi ollut rikki, olisi valunaikaisista lämpölaajenemisista johtuvat mekaaniset kuormat myös voineet hajottaa RFID-transponderin.

5.1.6.

2. Koevalu

Toista koevalua varten RFID -insertteihin tehtiin muutoksia paremman lämmönkestävyyden aikaan saamiseksi. Alkuperäisiin Teflon -inserttien aihioihin tehtiin suuremmat reiät RFID -transpondereita varten, jotta Teflonin ja RFID -transponderin väliin saataisiin eristävä ilmakerros eikä lämpö pääsisi näin johtumaan Teflonista suoraan RFID -transponderiin. Teflon -inserttien sisään asennettujen RFID -transponderien ympärille käärittiin kevyesti pieni määrä ohutta ja joustavaa lasikuitua, jotta transponderit saataisiin kellumaan Teflon -insertin sisällä olevassa reiässä ja näin ollen lämpöä eristävä ilmakerros olisi tasaisesti koko RFID -transponderin ympärillä. Transpondereille tarkoitetut reiät olivat halkaisijaltaan nyt 5 mm, joten noin 3 millimetrin halkaisijaltaan oleville transpondereille jäänyt eristävä ilmakerros oli paksuudeltaan noin yhden millimetrin ja 4 millimetrin halkaisijaltaan oleville transpondereille eristävän ilmakerroksen paksuus oli noin puoli millimetriä. Jotta Teflon kerroksen paksuus ei ohenisi suurempien reikien myötä, tehtiin toisen koevalun Teflon -insertistä muutamia millimetrejä alkuperäisiä kookkaammat.

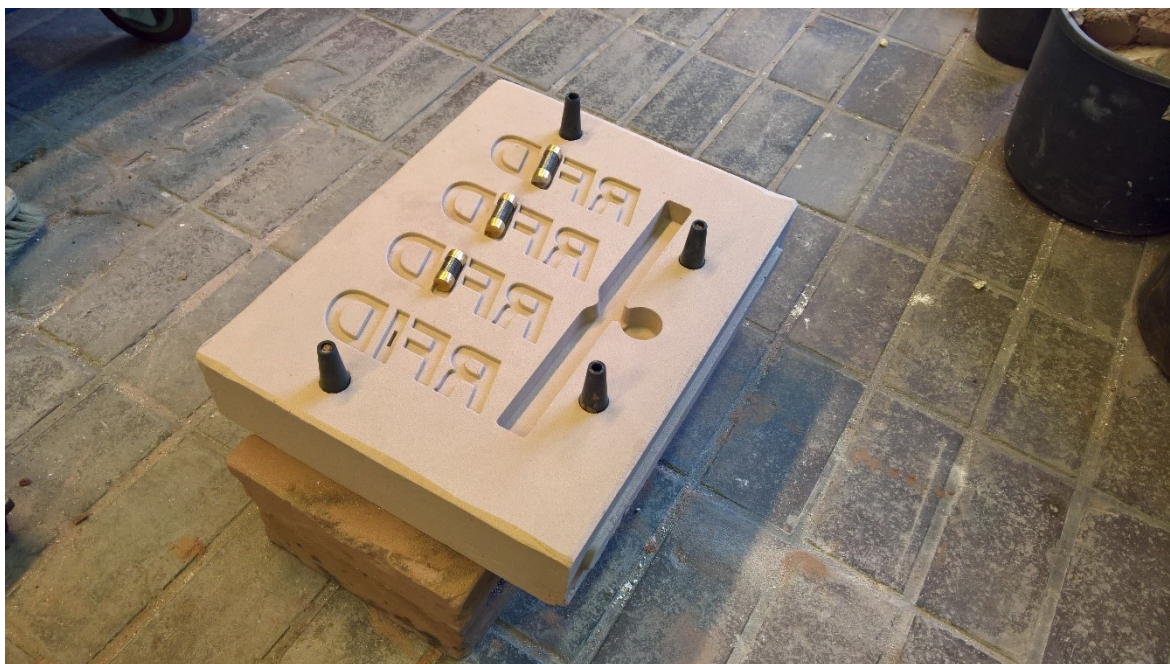
Teflon -inserttien sisälle tehdyn ylimääräisen ilmakerroksen ei ajateltu olevan kuitenkaan riittävä sulasta metallista siirtyvän lämmön eristämiseen, joten vielä Teflon -insertin ympärille suunniteltiin erillinen lämpöä eristävä metallikuori ja joka suojaisi myös Teflon -inserttejä suoralta sulakosketukselta eikä näin ollen myöskään palamisjälkiä pääsisi muodostumaan. Koska metallinen kuori johtaa hyvin myös lämpöä, eristettiin metallinen kuori Teflon -inserttien pinnasta pienellä jätetyllä ilmakerroksella. Ainoa kohta, jossa Teflon -insertti oli vielä kosketuksissa metalliseen kuoreen, oli aivan paikotusosan juuressa, muuten Teflonin ja metallikuoren välissä oli noin yhden millimetrin ilmarako. Paranneltujen RFID -inserttien toteutus näkyy kuvassa 56.



Kuva 56. Metallisten RFID-inserttien toteutustapa, jossa paremmat lämmönkesto-ominaisuudet.

Suojaava metallikuori valmistettiin teräsputkesta, jonka ulkopuolelle tehtiin kierteet koko pituudeltaan. Valmistettujen kierteisten metalliputkien toiseen sivuun tehtiin koko toisen sivun halkaiseva rako, jonka läpi Teflon -insertin paikusosa voitaisiin asentaa. Teflon -inserttien muoto hiottiin pyöreämmäksi, ettei se olisi kosketuksissa metalliseen suojakuoreen. Teflon -insertit tulpattiin lopulta kokonaan messinkisillä hatuilla, joissa oli valmistettuja teräsputkia vastaavat kierteet. Ennen koevaluja varmistettiin vielä RFID-transpondereiden toimivuus ja luettavuus metallikuoristen inserttien sisällä.

Koevalua varten kaavattiin yksi hiekkamuotti, johon kuvan 56 metalli-insertit asennettiin. Koska inserttien koko oli nyt merkittävästi suurempi kuin alkuperäiseen valujärjestelmään oli suunniteltu, kaiverrettiin käsin jo kaavattuihin hiekkamuotteihin inserttejä varten lisää tilaa. Lisäksi metallisen insertin tiedettiin jäädyttävän sulaa metallia nopeammin, joten alkuperäisessä suunnitelmassa olleita yhden millimetrin materiaalikerroksia kasvatettiin noin kolmeen millimetriin, jotta välttyttäisiin valujen epätäydelliseltä täyttymiseltä. Kuvassa 57 on nähtävissä metalli-insertit asennettuna alamuottiin ennen muottien yhdistämistä.



Kuva 57. Metalli-insertit asennettuna alamuottiin ennen valua.

Koska tehtyjen parannusten lopullisesta toimivuudesta ei ollut mitään takeita, valettiin kaavattu hiekkamuotti suoraan sinkkivaluna alemmassa 460 °C:n lämpötilassa. Alumiinivaluihin voitaisiin jatkaa myöhemmin, mikäli tekniikka onnistuisi ensin sinkkivaluina. Valun jälkeen hiekkamuotti avattiin ja arvioitiin valun onnistumista ensin visuaalisella tarkastelulla ja myöhemmin valukappaleiden valujärjestelmästä irrotuksen jälkeen RFID-tunnisteiden toiminnan testaamisella. Toisen koevalun koekappaleet näkyvät kuvassa 58.

Yhden koekappaleen osalta täyttyminen oli jäänyt hieman vaillinaiseksi metalli -insertissä olleiden messinkihattujen kohdalta, joissa oli myös ohuin valussa syntyvä materiaalikerros. Kaksi muuta testattua koekappaletta olivat paremmin täyttyneet. Metallisen insertin ansiosta pysyivät insertit kokonaisuudessaan tiukasti kiinni valutuotteessa, mutta pieni väljyys oli havaittavissa Teflon -insertin ja metallikuoren välillä, vaikka ennen valua messinkihattujen avulla metallikuori oli kiristetty tiukasti kiinni Tefloniin. Havaittu väljyys oli samaa luokkaa kuin ensimmäistenkin koevalujen sinkkivaluissa eikä palamisjälkiä näkynyt Teflonissa edelleenkään.

RFID-tunnisteen toiminnan testauksessa ei kuitenkaan saatu valettuja RFID -transpondereita reagoimaan RFID-lukijan kanssa. Lämmönjohtavuus RFID-transponderiin oli siis edelleen ollut liian suuri, vaikka suoraan Teflon -inserttiin kohdistuneiden lämpökuormien määrää oli merkittävästi vähennetty. Sulasta metallista syntyvä lämpökuorma on vain niin suuri, että Teflon -insertit täytyisi eristää sulakosketukselta kokonaisuudessaan, jotta RFID-transpondereilla olisi mitään edellytyksiä säilyä hiekkavaluista ehjinä. Tässä tapauksessa lämpöä pääsee helposti johtumaan vielä ainakin Teflon -insertin paikoitusosasta RFID-transponderiin.



Kuva 58. Toisen koevalun koekappaleet.

Toisen koevalun tuloksien perusteella ei valukokeita enää päätetty jatkaa vaikka parannusehdotuksia RFID-transponderien kestävyysnäkökulmasta vielä olisikin ollut niin parannellun inserttirakenteen kuin erillisten jäähdytysratkaisujenkin muodossa. Kokeiden pääasiallisena tarkoituksena oli kuitenkin mahdollisesti löytää yksinkertainen ja edullinen tapa valunsisäisen RFID-tunnisteen toteuttamiseksi hiekkavaluissa, mitä jo testattuja inserttirakenteita monimutkaisemmat rakenteet tai erilliset jäähdytysratkaisut eivät ainakaan lisää.

5.2. Koetulosten arviointi ja johtopäätökset

Koetulosten arvioinnissa käsitellään vaiheittain koevalujärjestelmän suunnitteluun vaikuttaneita asioita sekä testien aikana ilmenneitä ongelmakohtia, jotka vaikuttivat suunnittelun toteutukseen. Lisäksi arvioidaan testien onnistuminen yleisesti. Arvioinnissa otetaan kantaa myös käytetyn optimointityökalun toimivuuteen valimoiden tuotekehityksessä sekä älykkäiden tunnisteen käytettävyyteen valimoympäristöissä niin valusisäisen RFID-tunnisteen kuin vaihtoehtoistenkin tunnistetarkoitusten näkökulmista. Lopuksi kerrotaan omaakohtaisia näkemyksiä suositeltavista valutuotteiden tunnistus- ja seurantamenetelmistä tehtyihin kirjallisuusselvityksiin ja koetuloksiin nojaten.

5.2.1. MAGMASOFT -optimoinnin arviointi

Valujärjestelmän optimointi *MAGMA*⁵-ohjelman optimointityökalun avulla oli kokonaisuudessaan hyvin tehokasta. Vastaavan jakokanavistokonstruktion suunnittelu ilman optimointityökalua olisi laskennallisia menetelmiä käyttämällä tai ihan vain erilaisia designvaihtoehtoja kokeilemalla ollut mahdollisesti työläämpää ja ehkä enemmän aikaa vievää. Perinteisin keinoin suunniteltu valujärjestelmä olisi ollut vain valistunut arvaus hyvästä valu-

järjestelmästä eikä olisi voinut täysin varmistua siitä olisiko olemassa vieläkin parempia designvaihtoehtoja. Esimerkin optimoitu jakokanavisto olisi kuitenkin ollut hyvin yksinkertainen toteuttaa vielä perinteisin laskennallisin menetelmin, koska optimoidun jakokanavan geometria oli käytännössä vielä hyvin yksinkertainen. Jakokanavan optimoituun lopputulokseen päätyminen ei tässä tapauksessa kuitenkaan tarvinnut kovinkaan paljon ponnisteluja laskennan tai suunnittelun osalta, joten yksinkertaisellakin muuttujien valinnalla saatiin jo lupaavia tuloksia. Valutuotannossa valukanavien geometriat voivat tosin olla paljonkin monimutkaisempia ja pienilläkin muutoksilla voi olla suuria vaikutuksia. Tällöin kaikkien muutoksien vaikutusta ei ole helppoa heti huomata. Optimointityökalun avulla nämä vaikutukset voitaisiin todentaa ehkä huomattavasti vähemmällä suunnittelulla.

Koevaluja järjestelmän optimoinnissa muuttujaparametreina olivat nyt vain jakokanavan geometriaparametrit, joten esimerkiksi prosessiparametrien optimoinnin hyödyllisyydestä ei tässä diplomityössä ole esittää konkreettisia todisteita, mutta toimintaperiaate prosessiparametrien optimoinnissa etenisi täysin samalla periaatteella kuin valujärjestelmän osien geometriaoptimoinnissa. Pelkkien prosessiparametrien määrittäminen optimointia varten on jopa huomattavasti helpompaa kuin geometriaparametrien määrittäminen, koska prosessiparametreja ei tarvitse erikseen määrittää *MAGMA*⁵ -ohjelman Geometry -perspektiivissä.

Koevaluja järjestelmän jakokanavan geometriaoptimoinnissa ilmennyt *MAGMA*⁵ -ohjelman suuri heikkous on epäilemättä juuri geometriaparametrien määrittämisessä. Heti optimoinnin alkuun ilmeni, että optimoitava jakokanava täytyisi mallintaa *MAGMA*⁵:n omilla mallinnustyökaluilla, koska stl -tiedostona tuotu pintamalli ei sisällä mitään tietoja varsinaisen 3D-mallin mallinnuksessa käytetyistä mitoista, joita olisi voinut käyttää geometriamuuttujina. Toisin sanoen yksikään erillisellä CAD-ohjelmalla suunniteltu CAD-malli ei sisällä 3D-mallin muotoja synnyttävien piirteiden tietoja, jos CAD-malli tallennetaan stl -muodossa. Kolmeen erilaiseen 3D CAD-suunnitteluohjelmaan tutustuneena pystyin toteamaan, etteivät *MAGMA*⁵ -ohjelman omat mallinnustyökalut ole mitenkään käyttäjäystävällisimpiä eikä monimutkaisimpien muotojen luominen *MAGMA*⁵:n mallinnustyökaluilla ole välttämättä edes mahdollista. *MAGMA*⁵ -ohjelmaan on kuitenkin saatavana erillisellä lisenssillä erillisten CAD-ohjelmien omien tiedostomuotojen tuki parille eri CAD-ohjelmalle. Tällöin ylimääräisellä lisenssillä voisi periaatteessa geometriamuuttujien määrittäminen onnistua suoraan erillisellä CAD-ohjelmalla mallinnetun mallin avulla. Koska koekäytössä olleesta *MAGMA*⁵ -ohjelmasta ei löytynyt tukea CAD-ohjelmien omille tiedostomuodoille, ei asiaa voitu kuitenkaan testata käytännössä. Asian varmistamiseksi täytyisi ottaa yhteyttä *MAGMA*⁵ -ohjelman tarjoajiin. Tuotannon tasolla käytetään usein monimutkaisempia valujärjestelmän osia, joissa on mahdollisesti paljon kaarevia pintoja, ja joissa pienetkin muutokset voivat vaikuttaa suuresti syntyvän valukappaleen laatuun. *MAGMA*⁵ -ohjelman geometriaoptimoinnin käytettävyyden kannalta olisikin huomattavan paljon parempi, jos geometriaparametrit sisältävät 3D-mallit voitaisiin mallintaa erillisellä CAD-ohjelmalla.

Koevaluja järjestelmän optimoitava yksinkertainen jakokanava oli kuitenkin vielä helppo toteuttaa *MAGMA*⁵:n mallinnustyökaluilla ilman suurempia ongelmia. Tosin geometriaoptimoitavan mallin luomisessa tuli huomioda se, että malli myös rakennetaan niin, että optimoinnissa tarvittavat muuttujaparametrit syntyvät mallin mukana. Alkuperäinen jakokana-

van geometria oli esimerkiksi pääpiirteiltään vain pitkä suorakulmio, mutta optimointia varten sen perusmuotoa ei voinut mallintaa yksinkertaisena pitkänä laatikkona vaan se piti jakaa osiin, joista kuitenkin muodostuisi vastaava perusmuoto. Koevaluja järjestelmän jakokanavan malli muodostettiin siis vaikeamman kautta, jotta geometriamuuttujien muutokset vaikuttaisivat halutulla tavalla jakokanavan malliin. Toteutetussa jakokanavassa koko jakokanavan geometrian määrittävät jakokanavan päihin mallinnetut kaksi suorakaiteen muotoista pintamallia ja jakokanavan keskelle mallinnettu pieni kuutio. Näitä yhdistäneet jakokanavan muodot vain seurasivat näiden pääpiirteiden muodonmuutoksia.

Jakokanavan mallinnuksen jälkeen oli geometriaparametrien valitseminen ja niiden määrittäminen optimointia varten hyvin helppoa. Erityishuomiota joutui kuitenkin kiinnittämään siihen, että muuttujaparametrien muutokset eivät tapahtuisi väärin suuntiin. Koeoptimoinnin tapauksessa tämä jouduttiin toteuttamaan hieman hankalilla jakokanavan määrittävien muotojen koordinaattien määrittämisellä, mutta koordinaattien määrittämiseltä olisi ollut mahdollista myös välttyä, jos jakokanavan malli olisi mallinnettu alun perin tiukemmilla muuttujaehdoilla, jolloin parametrien muutokset olisivat muutenkin tapahtuneet aina tiettyihin suuntiin ja halutulla tavalla.

Kun kaikki muuttujaparametrit olivat tarkoin määriteltä, oli itse optimoinnin suorittaminen enää vain käytännössä tulosten odottelua. Hieman erityishuomioita joutui kiinnittämään tallennettaviin tuloksiin, koska jälkikäteen viiden vuorokauden optimoinnin jälkeen olisi ollut epämieluisaa todeta, ettei optimoinnista jäänyt talteen kaikkia tarvittavia tuloksia.

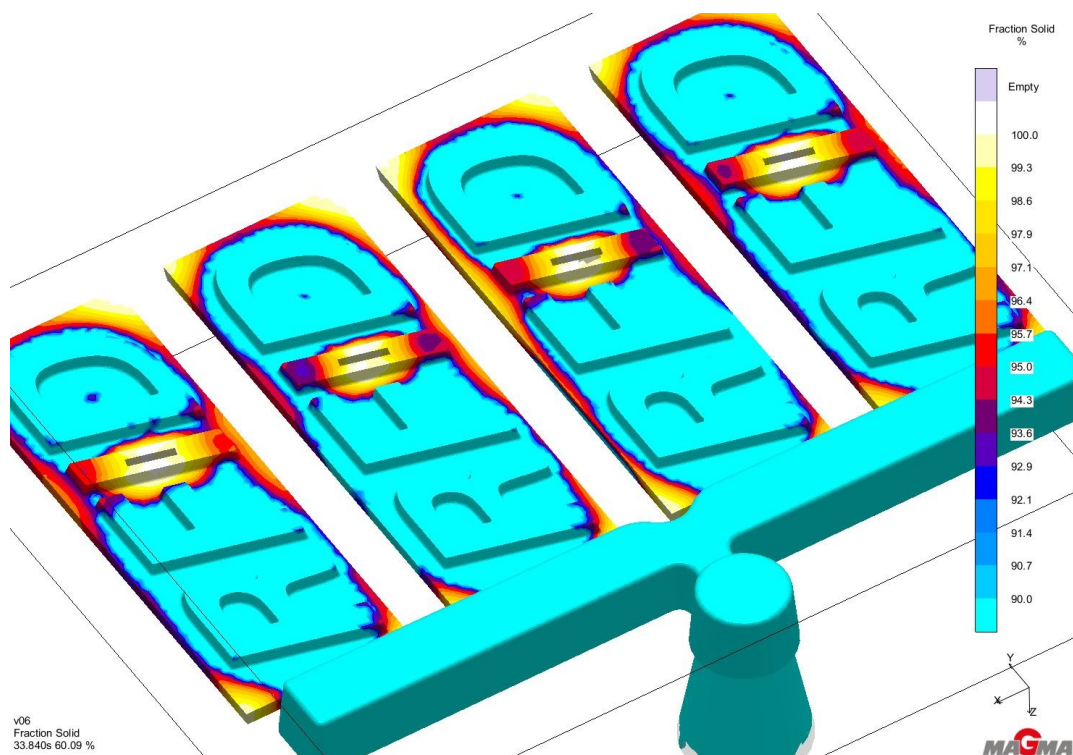
Vaikka koevaluja järjestelmän toiseen optimointikierrrokseen kuluikin yli viisi vuorokautta, voisi se tuotannollisissa tarkoituksissa olla huomattavasti nopeampi väylä onnistuneisiin koevaluihin perinteisiin suunnittelukeinoin verrattuna. Lisäksi täytyy muistaa, että tässä diplomityössä käytetyn *MAGMA*⁵ -ohjelman lisenssillä oli rajoitettu simuloinnin laskentakapasiteetti ja teollisuuskäytössä laskentakapasiteetit ovat yleensä moninkertaiset verrattuna nyt käytettyyn. Tosin optimoinnin muuttujia yhä lisäämällä saadaan helposti mistä tahansa optimoitavasta tapauksesta liian monimutkainen myös teollisuuskäyttöön, koska optimoitavien simulointimallien määrää kasvaa radikaalisti aina yhdenkin ylimääräisen designmuuttujan lisäyksellä. Optimointiin kuluva aika määrittyy lopulta täysin käyttäjän valinnoista, joten yksinkertaistamalla tai kohdentamalla simulointia voidaan optimoinnin laskenta-aikaa nopeuttaa huomattavasti tässäkin tapauksessa. Optimoinnin avulla voidaan myös helposti selvittää optimoinnin tavoitteisiin eniten vaikuttavat muuttujaparametrit, jolloin parametrien muutokset voidaan kohdentaa koskemaan vain näitä parametreja.

*MAGMA*⁵ -ohjelman automaattisesti järjestämän optimointitulosten paremmuusjärjestyksen avulla voitiin suoraan karsia suurin osa varmasti huonoista designvaihtoehdoista. Paremmuusjärjestyksen oikeellisuus voitiin vielä nopeasti todentaa visuaalisten simulaatiokuvien avulla, jolloin paremmuusjärjestyksen oikeellisuudelle ei jäänyt epäilyksen varaa. Koevaluja järjestelmän simuloinnissa mukana olleiden 168 erilaisen designvaihtoehdon läpikäyminen erikseen ilman *MAGMA*⁵ -ohjelman automaattisia analysointityökaluja olisi ollut aivan liian vaivalloista.

Koevalujärjestelmän optimoinnin avulla luotujen valukappaleiden laadulla ei ollut lopulta niin suurta merkitystä RFID-testien kannalta. Pääasiallisena tarkoituksena testattiin optimointityökalun käytettävyyttä ja kartoitettiin optimointityökalun mahdollisia puutteita. Esimerkiksi simulointitulosten perusteella oli havaittavissa, että sulan kulkeutuminen koevalutuotteiden onkaloihin valujärjestelmän sisäänmenoista tapahtui hieman turhan suurella sulan nopeudella, mikä ei valujen yleisen laadun kannalta ole mitenkään suotavaa. Valun suunnittelua käsittelevässä kappaleessakin todettiin, että turbulenttisen virtauksen ja siitä seuraavien ilmasulkeumien välttämiseksi valutuotteessa, tulisi alumiinisulan nopeus rajoittaa nopeuteen 0,5 m/s. Koevalujärjestelmän simulointimallissa sulan nopeus sisäänmenokanavien kohdalla vaihteli kuitenkin välillä 0,5 – 0,8 m/s. Valun suunnittelussa näitä ohjeellisia arvoja ei läheskään aina kuitenkaan saavuteta, koska ne ovat usein ristiriidassa muiden tuotannollisten vaatimusten kanssa. Sulan nopeutta olisi tässä tapauksessa voitu rajoittaa esimerkiksi suurentamalla sisäänmenojen poikkileikkauspinta-alaa, jolloin sisäänmenot eivät olisi olleet niin kuristavia ja täyttyminen olisi tapahtunut mahdollisesti rauhallisemmin. Tosin suuremmat sisäänmenot vaikeuttaisivat vain valutuotteiden irrottamista valujärjestelmästä. Simulointimallin perusteella oli havaittavissa myös suuri huokoisuuden todennäköisyys koevalukappaleiden R-, F- ja D -kirjaimien kohdalla, joissa olivat suurimmat materiaalikeskittymät. Huokoisuutta olisi voinut vähentää esimerkiksi vähentämällä materiaalivahvuutta näissä kohdissa tai syöttöjen suunnittelulla. RFID-testien kannalta ja yleensäkin valmistettujen valutuotteiden käytön kannalta tämä olisi kuitenkin ollut täysin turhaa. Simulointimallissa todetut sulan nopeudet ja huokoisuus ovat havaittavissa esimerkiksi kuvassa 60.

Suunniteltu valujärjestelmä toimi tehtävässään suunnitelman mukaisesti ja täyttäen kaikki valutuotteiden valuonkalot pääosin. Epätäydellinen täyttyminen osassa RFID -inserttien ympäristöä oli odotettavissa, koska tiedettiin, että alle 3 mm materiaalivahvuisen onkalon täyttyminen alumiinisessa hiekkavalussa voi jäädä vajaaksi. Vajaaseen täyttymiseen viittaa myös simulaatiomallin jähmettymistä indikoiva kuva 59, jossa aivan valutuotteiden dielektristen rakojen ympärillä on kohtia, jotka viittaavat vaillinaiseksi jäävään täyttymiseen. Kohdat ovat välittömästi rakojen pitkien sivujen reunoilla, joissa valkoisena näkyy ensimmäisenä kokonaan jähmettyneet kohdat ja harmaana näkyvät kohdat ovat jääneet kokonaan täyttymättä. Koevaluttuihin kappaleisiin vertaamalla voitiin todeta, että epätäydellinen täyttyminen on tapahtunut inserttien kohdalla juuri niin kuin simulaatiomallista olisi ollut ennustettavissa.

Testijärjestelmiin suunniteltiin alimmillaan vain yhden millimetrin materiaalivahvuuksia ja käsin valmistettujen RFID -inserttien toleranssirajoilla operoitaessa, saattoi valujärjestelmiin muodostua myös alle yhden millimetrin materiaalivahvuisia valuonkaloita. Se, että täyttyikö valujärjestelmät lopulta yhtä tasapainotetusti varsinaisissa koevaluissa kuin optimoidussa simulaatiomallissa, jää täysin arvailujen varaan. Sulan alumiinin kaato tapahtui koetilanteissa käsin kaatamalla, joten prosessiparametreista täyttymisaika, kaadon nopeus ja sulan lämpötilakaan eivät välttämättä täysin vastanneet simulointimallin määrittämiä ja valuparametreissa pienikin muutos voi joskus olla hyvinkin merkittävä.



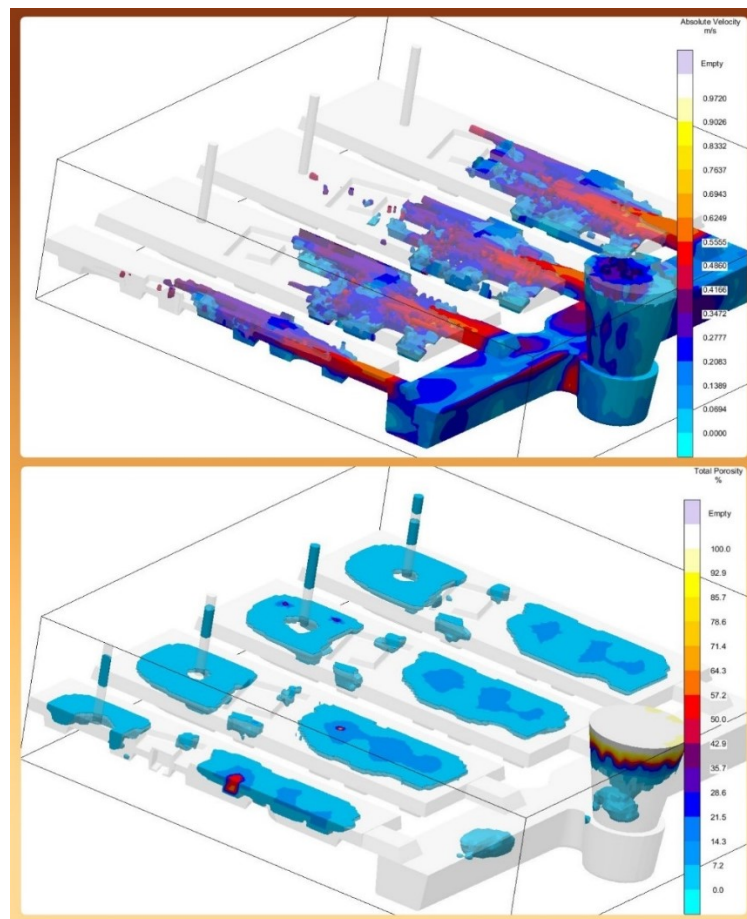
Kuva 59. Alumiinin jähmettyminen valujärjestelmässä noin 34 sekunnin jälkeen sulan kaadosta.

Koska jo pienetkin muutokset valuparametreissa ovat kriittisiä valutuotteen kannalta, voisi *MAGMA*⁵ -ohjelman optimointityökalua suositella otettavaksi käyttöön kaikkien tuotekehitysvaiheissa olevien valutuotteiden suunnittelussa. Optimoinnin valimokohtaisena pää tavoitteena voisi esimerkiksi olla yleisen laadun parantaminen valutuotteiden huokoisuutta vähentämällä tai materiaalinkäytön ja energiatehokkuuden optimointia ylimitoitettuja valukanavia pienentämällä tai valulämpötiloja alentamalla. Tarpeen mukaan optimointityökalua voisi käyttää myös haastavimmissa tuotekehitysongelmissa. Normaalin valusimuloinnin merkitystä ei voi kuitenkaan liiaksi korostaa, koska optimoinnin tehokkuus on täysin riippuvainen alkuperäisen valusimulaatiomallin paikkansa pitävyydestä. Koevalettavan valutuotteen simulaatiomallin tulee siis ensin vastata todellisuutta, jotta optimoinnista olisi ylipäättään mitään hyötyä. Optimointiparametrien määrittämisen jälkeen *MAGMA*⁵ -ohjelma hoitaa varsinaisen optimointimallien laskemisen kuitenkin automaattisesti, vaikka se kestäisikin useamman vuorokauden. *MAGMA*⁵ -ohjelman käyttäjä voi keskittyä sillä välin muihin asioihin. Ajankäytöllisesti lyhyelläkin optimointiparametrien määrittämisellä voi siis jo saada merkittäviä tuloksia aikaan, koska varsinainen parametrien määrittäminen ei välttämättä vie kuin muutaman minuutin riippuen optimoinnin tavoitteista.

*MAGMA*⁵ -ohjelman optimointityökalun template -malleja käyttämällä voidaan optimointiasetusten määrittämiseen kuluva aika vähentää myös. Mahdollisen usein toistuvan ja samanlaisen optimointiproseduurin hoitaminen onnistuisi valmiiden template -mallien avulla ehkä nopeammin ja rutiininomaisemmin. Template -mallien käyttöön riittäisi, että optimointiparametrit ovat ensimmäisellä kerran tarkkaan suunniteltu ja harkittu, jonka jälkeen uusien valutuotteiden osalta käytettäisiin samaa aiemmin määritettyä pohjaa. Lisäksi

useiden optimointitapausten jälkeen on kokemuksen myötä aina mahdollista kehittää ja tarkentaa aiemmin muodostettua template -mallia.

Optimoinnin tavoitteiden määrittämisessä täytyy tosin olla tarkkana varsinkin, jos optimoinnissa on vain yksi tavoite. Tällöin tavoitteen mukainen paras ratkaisu varmasti löytyy, mutta sama ratkaisu voi olla täysin toimimaton valutuotteen jonkin muun ominaisuuden kannalta. Esimerkkinä voisi olla huokoisuuden vähentäminen valutuotteesta, jonka huokoisuutta säädeltäisiin pelkästään syöttökupujen koolla ja määrällä. *MAGMA*⁵ -ohjelman ehdottama optimiratkaisu voisi tällöin olla esimerkiksi sellainen, jossa syöttökupujen määrä ja kokoluokat eivät ole enää realistisia valutuotteen tuotannon kannalta. Valujärjestelmiin tehtävien muutosten vaikutusten syvempi ymmärtäminen vaativat siis edelleen vankan tietämyksen ja kokemuksen sulan käyttäytymisestä valujärjestelmissä, jotta optimoinnin simulointituloksia osattaisiin tulkita ja käyttää oikein.



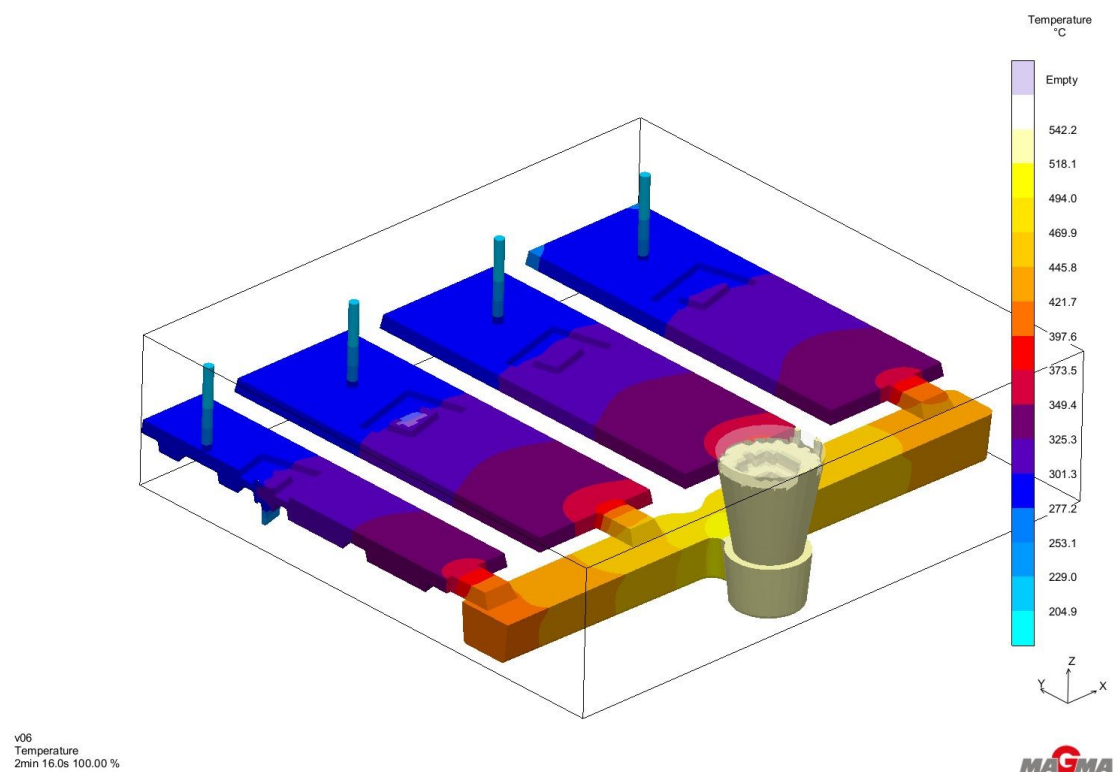
Kuva 60. Suunnitellun valujärjestelmän simulointimallissa havaitut sulan nopeudet(ylempi kuva) ja muodostuva huokoisuus(alempi kuva).

Yleisesti valusimulointi ja -optimointi olisi syytä suorittaa ennen varsinaisia valuja, jotta simulointimalleista saatava hyöty olisi maksimaalinen. Usein käytännössä käy kuitenkin edelleen niin, että simulaatiomalliin palataan vasta kun valutuotteen tuotannossa ilmenee ongelmia. Syy tähän on yleensä kiireestä johtuvaa, jolloin valmista simulaatiomallia ei edes

ole saatu aikaiseksi ennen kuin muotit ovat jo valmiina ja koevalut käynnissä. Mikäli koevalujen tuotteissa sitten ilmenee ongelmia, voi se vaatia muotteihin ja valutuotteisiin tehtäviä muutoksia, jotka taas lisäävät kustannuksia ja työmäärää merkittävästi. Tämän asian välttämiseksi ja oikean toimintajärjestyksen ylläpitämiseksi voisikin seuraava kehityssuunta olla se, että tarvittavat valuparametrit saadaan tuotannon käyttöön vain tuotantoon hyväksytystä valmiista simulaatiomallista.

5.2.2. Koevalutulosten arviointi

Koevaluissa testatuissa valunsisäisissä RFID-tunnisteissa olisi vielä paljon kehitettävää. Tehyjen Magmasoft -simulointien perusteella voitiin todeta, että sulan alumiinin kaadon jälkeen Teflon -inserttien ympärillä oleva lämpötila säilyi valujärjestelmässä yli 300 °C lämpötilassa noin kahden minuutin ajan (kuva 61). 327 °C on teflonin sulamislämpötila, joten valujärjestelmiin asennetut Teflon -insertit olivat alttiina suurille muodonmuutoksille koko tämän ajan. Ensimmäisen koevalun RFID-inserteissä näkyi palo- ja sulamisjälkiä Teflon -inserttien pinnoilla, mitkä tukivat simulointituloksia. Teflon -inserttien sulamisen johdosta jäivät insertit myös hieman väljiksi alumiinikappaleiden sisään.



Kuva 61. Lämpötilajakauma valujärjestelmässä 2 minuuttia sulan kaadosta.

Jotta väljyys ja palamisjäljet voitaisiin jatkossa mahdollisesti välttää, täytyisi inserttimateriaali vaihtaa johonkin korkeampia lämpötiloja kestäväseen materiaaliin, kuten esimerkiksi aiemmin inserttien materiaalinvalinnassa mainittuihin ja äärimmäisiä lämpötiloja kestäviin modifioituun PEEK:iin tai PBI:hin. Teoriaa tukee ensimmäisen koevalun yhteydessä tehdyt

sinkkivalut, joissa Teflon -insertit olivat säilyneet oikeastaan täysin muuttumattomina eikä väljyyttäkään juurikaan ollut. Sinkin valulämpötila koevaluissa oli yli 200 °C alumiinia alhaisempi. Materiaalin vaihtaminen suoraan ei edelleenkään estäisi liikaa lämpöä johtumasta insertin sisällä olevaan RFID-transponderiin hajottaen sen, joten myös insertin konstruktio vaatii tässä tapauksessa muutoksia.

Useiden kapselinmuotoisten RFID-transpondereiden tiedoissa oli mainittu transponderien säilyvän toimintakykyisinä kymmenen tuntia 140 °C lämpötilassa. Erillistä huippulämpötilaa transpondereille ei ollut annettu, mutta oletettavasti transponderit kestäisivät hetkellisesti myös suurempiakin lämpötiloja kuin mainitun 140 °C. Simulointitulosten perusteella voitiin arvioida, että valutuotteen lämpötila jäähtyi inserttien kohdalta alle 140 °C vasta 12 - 20 minuutin kuluessa alumiinin kaadosta, mikä oli selvästi liian pitkä aika RFID-transponderien ehjänä säilymiselle riippumatta niinkään insertin materiaalista. RFID-transponderit olivat ensimmäisessä koevalussa asennettu suoraan transponderin kokoisiin reikiin, joissa ei juurikaan ollut väljyyttä. Valun jälkeen hajonneita transpondereita tutkittaessa huomattiin, että transponderit olivat muodonmuutosten myötä kiinnittyneet vielä tiukemmin insertin seinämiin, jolloin insertin seinämissä ollut lämpö oli johtunut suoraan myös transponderiin. Tätä suoraa lämmönjohtavuutta heikennettiin tekemällä insertteihin väljemmät reiät transpondereita varten, jolloin eristävän inserttimateriaalin ja RFID-transponderin väliin jäisi lämpöä eristävä ilmakerros. Jotta eristävä ilmakerros olisi vielä tasaisesti koko RFID-transponderin ympärillä, transponderin ympärille lisättiin huokoinen eristesukka.

Transponderin ympärille jätetyn eristävän ilmakerroksen yksinään arvioitiin olevan kuitenkin vielä riittämätön lämmöneriste, joten käytetyn Teflon -insertin ympärille suunniteltiin lisäksi sulan alumiinin suoralta kosketukselta eristävä metallikuori. Myös metallikuoren ja Teflonin väliin jätettiin pieni eristävä ilmakerros. Ratkaisulla ajateltiin välttävän Teflonin palamiselta valun aikana kokonaan, useat eristekerrokset estäisivät RFID-transponderin ylikuumenemisen ja metallikuorinen insertti pysyisi kokonaisuudessaan tiukemmin kiinni alumiinivalussa. Useat eristekerrokset tosin lisäsivät aina RFID -insertin fyysistä kokoa, mikä ei ollut inserttien käytön kannalta mitenkään toivottavaa. Tuotannossa mahdollisesti toteutettavan RFID -insertin kannalta realistisen vaihtoehdon täytyisi toteutukseltaan olla mahdollisimman yksinkertainen ja kooltaan pieni. Mikäli insertin koko olisi valutuotteen kokoon nähden suhteellisen suuri, ei sen käyttö olisi enää järkevää. Liian suuri RFID -insertti alkaisi vaikuttamaan liikaa valutuotteen ominaisuuksiin eikä se visuaalisestikaan olisi mitenkään toimivimpia.

Teflon -insertin kierteillä toimiva sulkemistekniikka osoittautui jo ensimmäisissä koevaluissa hyvin toimivaksi ratkaisuksi. Inserttien tasalle katkaistut Teflon -ruuvit pysyivät tiukasti kiinni eikä sulaa päässyt vuotamaan insertin sisälle mitenkään. Samaan tekniikkaan päädyttiin myös suojaavan metallikuoren toteutuksessa, mutta lähinnä siksi, että se oli toteutustapana helppo ja nopea valmistaa. Ensimmäisissä koevaluissa tuli tosin huomattua, ettei Teflon -ruuvia voinut kiristää äärimmilleen RFID-transponderiin kiinni, koska se rikkoi usein transponderin lasisen ulkokuoren. Toisissa koevaluissa näin ei enää käynyt, koska transpondereille jätettiin eristävät ilmakerrokset Teflonin ja transponderin väliin.

Parannellusta lämmöneristyksestä huolimatta, eivät RFID-transponderit säilyneet toimintakykyisinä valuista vaikka toinen koevalu tehtiin alemman valulämpötilan sinkkivaluna. Jäähdytymisaika on hiekkavalussa yksinkertaisesti aivan liian pitkä RFID-transponderien ehjänä säilymiselle. Lopputuloksena voidaan todeta, että valunsisäinen RFID-tunniste hiekkavaluissa vaatisi erittäin huolellisen lämpösuunnittelun, ettei lämpötila RFID-transponderissa nousisi yli kriittisen pisteen. Käytännössä tämä tarkoittaisi mahdollisesti valuun asennettavan RFID -insertin fyysisen koon kasvattamista hyvinkin epäkäytännöllisiin mittasuhteisiin ja erillisten jäähdytysratkaisujen käyttämistä. Valunsisäinen RFID-tunniste hiekkavaluissa ei tällöin olisi käyttöominaisuuksiltaan kovinkaan edullinen tai mitenkään helppokäyttöinen tunnisteratkaisu. Varmempi ratkaisu olisi edelleen RFID-tunnisteen kiinnittäminen valutuotteeseen vasta jälkikäteen.

5.2.3. Valutuotteiden tunnistusmenetelmien arviointi

RFID-tunnisteen käyttäminen metallisten kappaleiden tunnistusmenetelminä toimii rajoitetusti. Metallisen ympäristön vaikutus RFID-tunnisteen toimintakykyyn on hyvin huomattava. Metallinen ympäristö lyhentää yleisesti RFID-tunnisteen lukuetaisyyksiä merkittävästi, vaikka erillisten absorptioratkaisujen avulla toimintakyky metalliympäristöissä mahdollistuu. Erilaiset RFID-tunnisteen absorptioratkaisut eivät kuitenkaan varsinaisesti paranna RFID-tunnisteen suorituskykyä yleisellä tasolla. Tosin suurempien taajuusalueiden RFID-teknologiolla lukuetaisyyksiä voidaan mahdollisesti vielä kasvattaa reilusti. RFID-tunnisteen merkittävämmäksi ongelmaksi muodostuu RFID-tagien heikko lämmönkestävyys valimo-olosuhteissa. Vaikka valutuotteeseen sopiva RFID-tunnisteratkaisu löytyisikin, vaativat useat valutuotteet vielä erilaisia hehkutus- ja vanhennuskäsittelyjä korotetuissa lämpötiloissa ja useiden tuntien ajan. Nämä useissa sadoissa lämpöasteissa tapahtuvat lämpökäsittelyt viimeistään rikkovat valutuotteissa olevat RFID-tagit. Ennen lämpökäsittelyjäkin voi valutuotteiden pintoihin kiinnitetyt RFID-tunnisteet olla toimintakyvyttömiä erilaisten valujen puhdistus- ja leikkauskäsittelyjen johdosta. Karkeiden valujen käsittelytapojen takia tulisi RFID-tunnisteet olla hyvin suojattuja ja mielellään valun sisässä turvassa.

Vaikka RFID-tunnisteet mahdollistaisivat monimutkaisten toimintojen suorittamisen automaattisesti ja langattomasti eivät ne valutuotteiden yksilöllisinä tunnisteratkaisuna toimisi parhaimmalla mahdollisella tavalla RFID-tagien rajoitettujen kestävyysominaisuuksien takia. RFID-tunniste valutuotteen yksilöllisenä ratkaisuna voisi olla toimiva esimerkiksi painevalettujen kevytmetallien kohdalla, koska painevalettut kevytmetallikappaleet eivät useinkaan ole lämpökäsiteltävissä mikrohuokoisuuden takia. Painevaletuille kappaleille voidaan myös helpommin soveltaa koevalujen sisäistä RFID-tunnistetta, koska painevalutuotteen jäähdytymisaika on huomattavasti lyhyempi verrattuna muihin valumenetelmiin. Lisäksi valutuotteen välittömällä sammutuksella heti muotista irrotettaessa voitaisiin sisäisen RFID-tunnisteen toimintakyky varmistaa. Pitkän jäähdytysajan huomattiin olevan koevaletuissa hiekkavaluissakin suurin syy RFID-transponderien hajoamisiin. Tosin myös painevaluissa sisäinen RFID-tunniste vaatisi aina jonkinlaisen suojaavan eristerakenteen, mikä aina kasvattaa RFID-tunnisteen vaatimaa tilaa valutuotteessa. Tämä rajoittaa valunsisäisen

RFID-tunnisteen käyttämisen vain kokoluokaltaan suuremmissa valutuotteissa ja lisäksi valutuotteisiin täytyisi aina tarkoin suunnitella RFID -inserteille oma paikka.

RFID-tunnistetta valutuotteen yksilöllisenä tunnistemenetelmänä ei siis voi yleisesti suositella käytettäväksi edellä mainituista syistä ja yksilölliseksi valutuotteen valuprosessien aikaiseksi tunnistusmenetelmäksi RFID-tunnisteita täytyisi kehittää vielä paljon eteenpäin. Tällä hetkellä RFID-tunnisteiden käyttämisen mahdollisuus rajoittuu vain marginaaliseen osaan valutuotetyypeistä, joten RFID -tunnisteiden ympärille mahdollisesti rakennettavan tehokkaan digitaalisen prosessidatan hallintajärjestelmän rakentaminen olisi kustannuksiltaan merkittävä, mutta käyttöominaisuuksiltaan mahdollisesti myös hyvin rajoitettu koskemaan vain tiettyä osaa valimon valutuotteista ja vain tiettyä osaa valimon tuotantoketjua. RFID-tunnisteita voi käyttää tosin monella eri tavalla, kuten valutuotannon digitalisointia käsittelevän johdantokappaleen esimerkkitapauksista ilmenee. RFID-tunniste ei ehkä toimisi valutuotteen yksilöllisenä ratkaisuna optimaalisesti, mutta RFID-tunnisteita voisi tehokkaasti käyttää valimon muissa osa-alueissa, jotka kuitenkin liittyvät tiukasti valuprosessien ja valutuotteiden hallintaan.

Valutuotteista kerättävän yksilöllisen prosessidatan keräykseen soveltuvista tunnistusmenetelmistä suurin potentiaali löytyy ehkä kuitenkin 2D-kuviokooditeknologioista. Yhä syvenevässä digitalisoitumisessa tulisi tehokkaat tunnisteratkaisut ottaa pikimmiten käyttöön, jotta saavutettaisiin mahdollisesti merkittävä kilpailuetu kansainvälisessä kilpailussa. 2D-kuviokoodit ovatkin jo nyt sellaisinaan toimivia oikeastaan kaiken tyyppisissä valutuotteissa ja erilaisia kaupallisia merkintätapateknologioita on jo saatavilla moneen eri tarpeeseen. Esimerkiksi lasertekniikoilla erilaisia ja erikokoisia 2D-kuviokoodimerkintöjä voidaan tuottaa kaikenlaisille metallipinnoille. Tällöin esimerkiksi aivan pienimpiinkin valutuotteisiin olisi mahdollista tuottaa yksilöllisiä tunnistemerkinntöjä. Lasertekniikoista ja laseroitavasta pinnasta riippuen määräytyy tunnisteiden lopullinen kestävyys valutuotteen pinnassa, mutta vaihtoehtoja, joista valita valimon yksilöllisiin tarpeisiin sopivin lasertekniikka, on useita. Huomattavasti edullisempi, mutta myös hyvin tehokas merkintätekniikka 2D-kuviokoodimerkintöjen tuottamiseen löytyy erilaisista pistemäisistä iskutyökaluista, joista löytyy kaupallisesti niin käsin pidettäviä merkintälaitteita kuin automatisointiin soveltuvia kiinteitä merkintälaitteita. Iskutyökalut eivät sovellu ehkä aivan pienimmille valutuotteille, mutta muuten iskutyökalut soveltuvat lähes kaiken tyyppisille valutuotteille tuottaen kestävä 2D-kuviokoodimerkinnän.

RFID-tunnisteisiin verrattuna 2D-kuviokoodimerkinnät säilyvät toimintakykyisinä, vaikka altistuisivatkin suurille lämpötiloille, koska 2D-kuviokoodimerkintä olisi kiinteä osa valutuotetta itsessään. 2D-kuviokoodilla toteutettujen tunnistemerkinntöjen lukemisen ja käytön voi yhtälailla automatisoida kuten RFID-tunnisteetkin. Tunnisteiden lukemisen voisi siis hoitaa erilaisilla käsin pidettävillä skannereilla tai kiinteästi asennetuilla prosessipisteiden skannereilla. Riippuen merkintätavoista, kestäisivät 2D-kuviokoodit valutuotteiden pinnalla myös karkeissa valutuotteiden käsittelyprosesseissa. Merkintätapana 2D-kuviokoodit säilyisivät siis valutuotteiden pinnoilla useimmilla merkintätekknologioilla toteutettuna, kuten nykyisinkin paljon käytössä olevat numerokooditunnisteet valutuotteiden pinnoilla. 2D-kuviokooditunnisteen toimivuutta lisää vielä merkittävästi 2D-kuviokoodien kyky säilyä

toimintakykyisinä vaikka osa merkinnästä vioittuisikin valutuotteiden käsittelyissä, mikä tekee 2D-kuviokoodien käytöstä vieläkin varmemman. 2D-kuviokoodeja metallisten tuotteiden yksilöllisinä tunnisteina on otettu jossain määrin jo käyttöönkin muun muassa autoteollisuudessa.

Yhtä yleispätevää valutuotteiden tunnistemerkintätapaa ei kuitenkaan valimoille ole tarjolla vaan valimon tuottamiin valutuotteisiin sovellettavan yksilöllisen merkintätavan löytämiseksi täytyy aina kartoittaa valimoiden yksilölliset tarpeet, joissa myös valutuotteiden yksilöllisiä tunnistemerkintöjä voisi tehokkaimmin käyttää. Tämän mukaan voidaan valita valimoon parhaiten soveltuva merkintäteknologia valutuotteiden tunnistamiseksi. Voihan myös olla, että valutuotetyypeistä riippuen valutuotteiden yksilöllisen prosessidatan keräämisen sijaan olisi valimossa parempi käsitellä useita valutuotteita saman tunnisteiden alla, jolloin RFID-teknologiat voisivat olla taas parempi vaihtoehto valimon tarpeisiin.

6. Yhteenvedo

Suomalaiset valimot eivät tuotantovolyymltaan kilpaile maailman suurien valutuottajien kanssa, joten pienempien tuotantomäärien vuoksi tulee suomalaisten valimoiden panostaa muuntautumiskykyynsä tarjotakseen asiakkaille laadukkaita valutuotteita tehokkaasti ja lyhyillä tuotekehitysajoilla. Tavoitteeseen päästäkseen on suomalaisten valimoiden tuotekehityksessä, ja jonkin verran myös tuotannossa, otettu käyttöön yhä enenevässä määrin nopeita 3D-tulostustekniikoita niin valumallien kuin valmiiden muottien valmistuksessa. Jatkuvasti kehittyvällä automaatiolla on korvattu useita aikaa vieviä toimenpiteitä ja näin tehostettu tuotantoa ja parannettu valutuotteiden laatua. Laajan kerätyn alihankintaverkon avulla ovat valimot yleisesti voineet keskittyä ydinsaamiseen.

Valusimulointi uuden valutuotteen tuotekehityksessä on ollut valimoissa yleisesti käytössä. Kehittyneempiä optimointimenetelmiä ei kuitenkaan ole vielä laajemmin käytössä. Valuoptymoinnilla voidaan esimerkiksi valutuotteiden laatua yleisesti parantaa tai minimoida valimon materiaalin käyttöä valukanavistoja optimoimalla. Valuoptymointi *MAGMA*⁵ -ohjelmaa käyttäen on toimenpiteenä suhteellisen yksinkertainen, joten valuoptymoinnin lisääminen normaalin valusimuloinnin yhteyteen ei vaatisi merkittävästi lisävoimavaroja ohjelman käyttäjiltä.

Yhä syvenevä digitaalisuus tuo mukanaan uusia mahdollisuuksia tehostaa myös valimoiden tuotantoa entisestään sekä mahdollisuuden synnyttää kokonaan uutta liiketoimintaa esimerkiksi avoimemman asiakasyhteistyön avulla. Digitaalisessa valimossa valutuotteet ja prosessilaitteet keskustelisivat keskenään automaattisin toiminnoin, jolloin prosessien aikaista dataa liikkuisi sekä valutuotteesta prosessilaitteisiin, että prosessilaitteista valutuotteeseen ja valutuotteen yksilölliseen tunnisteeseen jäisi muistiin valutuotteen koko tuotantohistoria käytetyin valuparametrein. Kerättyä dataa analysoimalla olisi mahdollisuus tehostaa valutuotantoa reaaliajassa ja ennakoida tulevia virhetilanteita. Pidemmältä aikaväliltä kerättyä dataa analysoimalla olisi mahdollisuus kehittää valutuotantoa edelleen etsimällä valuparametreista syy- ja seuraussuhteita erilaisiin valutuotannossa syntyviin ongel-

matilanteisiin. Avoimen digitaalisen alustan avulla kerättyä dataa voisi luovuttaa myös sovelluskehittäjien käyttöön datan tehokkaamman käytön mahdollistamiseksi, tuotannon kehittämiseksi ja uudenlaisen liiketoiminnan luomiseksi.

Nykyisillä valutuotteen tunnistemerkinnöillä, jotka käsittävät yleensä enintään valutuotteessa olevan valuerän ja valuajan, ei valutuotteita voi yksilöllisesti tunnistaa eikä tarkempaa prosessidataa kerätä. Tarkempi prosessidata jää tunnistetiedoista pois, koska sama tunniste koskee yleensä koko valuerää. Ideaalinen valunsisäinen ja yksilöllinen RFID-tunniste toteutuessaan olisi käyttöominaisuuksiltaan ehkä viiva- ja 2D-kuviokoodoja varmempi ratkaisu valutuotteen koko elinkaarta ajatellen, koska se säilyisi valutuotteen sisällä suojassa eikä sen poistaminen onnistuisi muuten kuin rikkomalla itse valutuote. Toimiakseen valuprosessien aikaisina tunnisteinä, täytyisi RFID-tagien kestää pitkiä aikoja äärimmäisiä lämpötiloja, mikä olemassa olevilla RFID-teknologioilla on hyvin vaikea toteuttaa siten, että se olisi vielä taloudellisesti kannattavaa eikä RFID-tunnisteiden fyysinen koko vaikuttaisi valutuotteiden muihin ominaisuuksiin. Tämän perusteella 2D-kuviokooditekniikat olisivat kuitenkin parempi ratkaisu valutuotteiden yksilöllisessä seurannassa. 2D-kuviokooditekniikoiden käyttöönottoa helpottavat erityisesti jo saatavilla olevat useat kaupalliset teknologiaratkaisut, joilla kestäviä 2D-kuviokoodoja voitaisiin tuottaa kaiken kokoisten metallisten valutuotteiden pintaan. 2D-kuviokoodi voi myös pienimuotoisesti vioittua, mutta 2D-kuviokoodimerkinnän sisältämä tieto olisi vielä edelleen luettavissa. Mahdollisia 2D-kuviokoodien käytön heikkouksia RFID-tunnisteisiin verrattuna ovat yleisesti pienempi datakapasiteetti, merkinnän muokkaamattomuus jälkikäteen ja turvallisuusnäkökohdat. Lisäksi 2D-merkintä valutuotteen pinnalla voi edelleen vioittua kokonaan lukukelvottomaksi vaikka merkintätapa sietääkin pienen kolhiintumisen.

Vaikka RFID-tagien käyttö valutuotteiden yksilöllisinä tunnisteinä ei ole täysin toimiva ratkaisu useimpien valutekniikoiden ja valutuotteiden osalta, voi RFID-teknologioita hyödyntää valimoympäristöissä tehokkaasti myös muilla tavoin. Maailmalta löytyy paljon esimerkkejä RFID-teknologioiden onnistuneesta käytöstä erilaisissa valimoympäristöissä. Valimon tarpeisiin soveltuvien valutuotteiden yksilöllisten tunnistusmenetelmien löytämiseksi täytyy tilannetta katsoa aina tapauskohtaisesti. Parhaiten soveltuvien merkintätapojen löytäminen riippuu suuresti tuotettavien valutuotteiden tyypeistä ja käytetyistä valutekniikoista, joten sopivan tunnistusmenetelmän valinta on hyvin tapauskohtaista.

Lähteet

1. Tekno ja Digi [Internet].: Teknologiateollisuus ry; 2016 [cited 04.11.2016]. Available from: <http://teknologiateollisuus.fi/fi/tietoa-alasta/tekno>.
2. Digitalisaatio. Teollisesta internetistä uutta kasvua [Internet].: Teknologiateollisuus ry; 2015 [cited 04.11.2016]. Available from: <http://teknologiateollisuus.fi/fi/elinkeinopolitiikka/digitalisaatio/teollisesta-internetista-uutta-kasvua>.
3. Korhonen S, Valli K. Teollisen yrityksen digitalisoitumisen käsikirja. Teknologiateollisuus ry, ISBN 978-952-5998-71-9, 978-952-5998-72-6 (pdf); 2014.

4. Kaupan Liitto, Liikenne- ja viestintäministeriö, Tekes, Teknologiateollisuus ry, Verkkoteollisuus. Digibarometri 2016. Helsinki: Taloustieto Oy; 2016.
5. MacDougall W. *Industrie 4.0 - Smart Manufacturing for the Future*. Berlin: Germany Trade & Invest; 2014.
6. Jung RP. *The Digital Transformation - Chances and Challenges for the Foundry Industry*. Stauf. [CAEF International Foundry Forum] . 23.09.2016; Dresden. The European Foundry Association.
7. Vellen T. Foundry industry: Focus on resource optimisation and energy efficiency. GIFA – the 13th International Foundry Trade Fair. [Internet]. 2015 [cited 26.10.2016]. Available from: http://www.gifa.com/cipp/md_qmtn/custom/pub/content,oid,109064/lang,2/ticket,q u e s t/local lang,2.
8. Global Metal Casting Market 2016-2020. [Research report] [Internet].: Technavio; 2016 [cited 26.10.2016]. Available from: <http://www.technavio.com/report/global-unit-operations-metal-casting-market>.
9. Piha O. Suomen valimoteollisuus 2015. Valimoviesti. Suomen valimotekninen yhdistys ry. 2016;3:10-7.
10. Gerhard K. Current status and perspectives of the German foundry industry. 31.03.2016; Valun käytön seminaari, Tampere. Teknologiateollisuus, Valutuoteteollisuusyhdistys ry.
11. Statistics [Internet].: CAEF - The European Foundry Association; 2016 [cited 26.10.2016]. Available from: <http://www.caef.org/downloads/kategorie.asp?kat=9>.
12. Büchner H. *Global Economy and the Situation of the Foundry Industry*. IKB. [CAEF International Foundry Forum] . 23.09.2016; Dresden. The European Foundry Association.
13. Global Aluminum Casting Market 2016-2020. [Research report] [Internet].; 2016 [cited 26.10.2016]. Available from: <http://www.technavio.com/report/global-metals-and-minerals-aluminum-casting-market>.
14. Wadhwa RS, Lien TK. Manufacturing automation for environmentally sustainable foundries. In: *Re-engineering Manufacturing for Sustainability*. Springer; 2013. p. 171-4.
15. Jekl J, Auld J, Sweet C, Carter J, Resch S, Klarner A, et al. Development of a Thin-Wall Magnesium side door Inner Panel for Automobiles. 2015.
16. Sirola P, Parkas J, Kontio J. Componenta Finland Oy [Interview]. Karkkila. 27.10.2016.
17. Partanen J. 3D-Tulostuksen nykytrendit. Aalto-yliopisto. 31.03.2016; Valun käytön seminaari, Tampere. Teknologiateollisuus, Valutuoteteollisuusyhdistys ry.
18. Ferreira J. Manufacturing core-boxes for foundry with rapid tooling technology. *J Mater Process Technol*. 2004;155:1118-23.

19. Moilanen V. *Hiekkamuottien 3D-tulostaminen*. Hetitec Oy. 31.03.2016; Valun käytön seminaari, Tampere. Teknologiateollisuus, Valutuoteteollisuusyhdistys ry.
20. Heinemann T, Machida W, Thiede S, Herrmann C, Kara S. A hierarchical evaluation scheme for industrial process chains: aluminum die casting. In: *Leveraging Technology for a Sustainable World*. Springer; 2012. p. 503-8.
21. Herrmann C, Heinemann T, Thiede S. Synergies from Process and Energy Oriented Process Chain Simulation—A Case Study from the Aluminium Die Casting Industry. In: *Glocalized Solutions for Sustainability in Manufacturing*. Springer; 2011. p. 317-22.
22. Magmasoft. *Solutions and Services*. [Internet].: MAGMA; 2016 [cited 01.11.2016]. Available from: http://www.magma-soft.com/en/solutions/MAGMA_5.html.
23. Egner-Walter A, Hartmann G, Kothen M. Integration of manufacturing process simulation in to the process chain. Closing the gap between CAE supported design and manufacturing process simulation. 2002.
24. Wadhwa RS. Flexibility in manufacturing automation: A living lab case study of Norwegian metalcasting SMEs. *J Manuf Syst*. 2012;31(4):444-54.
25. Valukappaleet koneistuksen kannalta. Tampereen kaupunki [Internet].: ValuAtlas; 2012 [cited 26.10.2016]. Available from: <http://koulut.tampere.fi/materiaalit/valimo2/>.
26. Meskanen S, Höök T. Hiekkavalimon valimoprosessi. ValuAtlas. [Internet]. 2011 [cited 26.10.2016]. Available from: <http://www.valuatlas.fi/tietomat/koosteet/valimoprosessi/index.html>.
27. Maantila M, Nieminen T, Siivo J, Tuominen M. Oras Group [Interview]. Rauma. 08.11.2016.
28. Zitting H, Tuominen I. Sacotec Components Oy [Interview]. Riihimäki. 25.10.2016.
29. Powering The Digital Transformation of Electricity [Internet].: GE Power; 2016 [cited 04.11.2016]. Available from: <https://www.ge.com/digital/sites/default/files/Power%20Digital%20Solutions%20Product%20Catalog.pdf>.
30. Lee J, Lapira E, Bagheri B, Kao H. Recent advances and trends in predictive manufacturing systems in big data environment. *Manufacturing Letters*. 2013 10;1(1):38-41.
31. Swedberg C. Foundry Improves Core Operations. *RFIDJournal* [Internet]. 2010 [cited 23.11.2016]. Available from: <http://www.rfidjournal.com/articles/view?7330/>.
32. FOUNDRY Management & Technology. Automotive Foundry Uses RFID to Manage Plant Logistics. FMT Staff [Internet]. 2008 [cited 23.11.2016]. Available from: <http://foundrymag.com/feature/automotive-foundry-uses-rfid-manage-plant-logistics>.
33. Smiley S. Work-in-Progress with RFID. atlasRFIDstore [Internet]. 2015 [cited 23.11.2016]. Available from: <https://www.atlasrfidstore.com/rfid-work-in-progress-signicast/>.

34. Sikorski S, Dieckhues GW, Sturm JC. Systematic optimization of aluminum sand casting gating systems. American Foundry Society. 2012.
35. Campbell J. Castings. Oxford ; Boston: Butterworth-Heinemann; 1993.
36. Componenta Finland Oy. Casting system design principles and simulation[Power Point -sheets]. 05.10.2011; .
37. Magmasoft. Magma5. Online help guide for product version 5.3.0. 2015.
38. Wadhwa RS, Lien TK. Framework for Implementing Internal Part Traceability in Iron Foundry. CSER; ; 2013.
39. Steel GR, Bogatay JD, Brosnan BJ, Coffey PA, inventors; System for identifying castings and for tracking casting process parameters. patent US 5894005 A. 1999 04/13.
40. Ventura CEH, Aroca RV, Antonialli AÍS, Abrão AM, Rubio JCC, Câmara MA. Towards Part Lifetime Traceability Using Machined Quick Response Codes. Procedia Technology. 2016;26:89-96.
41. Velandia DMS, Kaur N, Whittow WG, Conway PP, West AA. Towards industrial internet of things: Crankshaft monitoring, traceability and tracking using RFID. Robot Comput Integrated Manuf. 2016;41:66-77.
42. Metal Bar Code Labes for Industrial Work In Process Applications [Internet].: Camcode Division of Horizons Inc; 2015 [cited 18.01.2017]. Available from: <https://www.camcode.com/metal-wip-labels.html>.
43. J. Gao, V. Kulkarni, H. Ranavat, L. Chang, H. Mei. A 2D Barcode-Based Mobile Payment System. 2009 Third International Conference on Multimedia and Ubiquitous Engineering; ; 2009.
44. APPLICATION OF DATAMATRIX IDENTIFICATION SYMBOLS TO AEROSPACE PARTS USING DIRECT PARTMARKING METHODS/TECHNIQUES (Document: NASA-HDBK-6003B) [Internet].: NASA Technical Standards System; 2009 [cited 15.12.2016]. Available from: <https://standards.nasa.gov/file/674/download?token=cEU7IKXK>.
45. 2D Code Marking Systems [Internet].: Telesis Technologies, Inc; 2017 [cited 18.01.2017]. Available from: http://www.telesis.com/markinq_systems/2dmarking.htm.
46. Galleries - Dot Peen Photos [Internet].: SherTec Inc; 2012 [cited 18.01.2017]. Available from: <http://www.shertec.com/galleries/Dot-Peen-Photos#prettyPhoto>.
47. Vedel-Smith NK, Lenau TA. Casting traceability with direct part marking using reconfigurable pin-type tooling based on paraffin-graphite actuators. J Manuf Syst. 2012 4;31(2):113-20.
48. Coulson SE, inventor; Method of investment casting with casting identification. patent US 6582197 B2. 2003 .
49. Wang Y, Wang Y, Yang Y. Understanding the determinants of RFID adoption in the manufacturing industry. Technological Forecasting and Social Change. 2010 6;77(5):803-15.

50. Leung J, Cheung W, Chu S. Aligning RFID applications with supply chain strategies. *Information & Management*. 2014;51(2):260-9.
51. Airista flow technology [Internet].: AiRISTA Flow; 2016 [cited 09.12.2016]. Available from: <https://www.airistaflow.com/products/technology/>.
52. Derakhshan R, Orlowska ME, Li X. RFID data management: challenges and opportunities. *IEEE International conference on RFID*; ; 2007.
53. R. Want. An introduction to RFID technology. *IEEE Pervasive Computing*. 2006;5(1):25-33.
54. Fricknet. Products. SmartMark_RFID [Internet].: William Frick & Company; 2016 [cited 15.12.2016]. Available from: https://www.fricknet.com/Products/SmartMark_RFID/?applications=40&industries=0&keywords=1.
55. Pille C. In-process-embedding of piezo sensors and RFID transponders into cast parts for autonomous manufacturing logistics. *Smart systems integration*. 2010:1-10.
56. Casting technology - From ideas to products [Internet].: Fraunhofer IFAM; 2016 [cited 13.12.2016]. Available from: http://www.ifam.fraunhofer.de/content/dam/ifam/en/documents/Shaping_Functional_Materials/casting_technology/casting_technology_fraunhofer_ifam.pdf.
57. Bernhard J, Leipold T, Pflaum A, Wansch R. RFID in Metallic Environment. *RFID Systems and Technologies (RFID SysTech)*, 2007 3rd European Workshop on; VDE; 2007.
58. Lehmhus D, Aumund-Kopp C, Petzoldt F, Godlinski D, Haberkorn A, Zöllmer V, et al. Customized Smartness: A Survey on links between Additive Manufacturing and Sensor Integration.
59. HID Glass Tags for Industry and Logistics [Internet].: HID Global; 2016 [cited 15.12.2016]. Available from: <https://www.hidglobal.com/products/rfid-tags/identification-technologies/glass-tags-industry-and-logistics>.
60. Mayer D, Stoffregen HA, Heuss O, Thiel J, Abele E, Melz T. Additive manufacturing of active struts for piezoelectric shunt damping. *J Intell Mater Syst Struct*. 2016;27(6):743-54.
61. Granta Design. CES EduPack. ;2016.
62. PTFE - Material Safety Data Sheet [Internet]. USA: SKC Omega Specialty Division; 2010 [cited 24.02.2017]. Available from: <http://www.plasticdesignmfg.com/pdf/PTFE-MSDS.pdf>.
63. Höök T, Meskanen S, Orkas J, Tennilä P. Suunnittelijan perusopas - 6. valustandardit. [Internet]. 2009 [cited 24.02.2017]. Available from: <http://www.valuatlas.fi/tietomat/koosteet/valukappa-leensuunnittelu/index.html>.

Liitteet

Liite 1. Haastattelurunko. 4 sivua.

Liite 1. Haastattelurunko

Liite 1 (1/4)

HAASTATTELURUNKO

Haastateltavan tiedot

Nimi _____

Toimen-
kuva _____

Valimon tyyppi

1. Mitä valuja ja valutapa?

2. Onko käytössä useita eri tuotantolinjoja/valutapoja?

Kommunikointi asiakkaan kanssa

3. Miten valukappaleiden (3D/2D/muu) tiedostojen lähettäminen/jakaminen tapahtuu asiakkaan kanssa?

4. Miten kommunikointi designmuutoksista/valusimuloinneista asiakkaan kanssa tapahtuu ja kuka tekee muutokset malleihin?

5. Asiakkaan reaaliaikainen tiedottaminen tuotannon tilasta - Miten koevalujen tuloksista tiedottaminen tapahtuu? Saako asiakas reaaliaikaista tietoa missä vaiheessa tuotantoa tilaus etenee? Kuinka tarkkaan toimitusaika voidaan määrittää asiakkaalle? Miten ilmoitus viivästyksistä ja kuinka nopeasti kynnys ylittyy?

6. Sopimusasiakkaat - Onko käytössä toimitusaikalupauksia / kapasiteettivaroja?

7. Miten toimitusaika- / sarjakokopaine asiakkailta ilmenee (tilauksista tulkittu trendi vai aktiivisesti ilmaistu vaatimus)?

-
-
8. Asiakaspalaute, vialliset tuotteet - Miten palautus? Koska tieto viallisesta tuotteesta saapuu perille? tuleeko ennakkoilmoitus? Mitä dataa saadaan irti palautetusta tuotteesta(Sulatus? Sarja? Erä? Milloin valettu? Kuka teki?)?
-
-
-

9. Mitä tietoa valukappaleesta asiakas saa irti pelkän valukappaleen perusteella?
-
-

Toimintamenetelmät ja tuotannonohjaus

10. Raaka-aineet - Mitä ja mistä? Kuinka paljon kierrätysromua/hiekkaa? Onko huomattu, että kierrätysmetallista olisi myöhemmin ilmennyt ongelmia valuissa? Pystyykö paikantamaan kaikki heikkolaatuisen sulapanoksen tuotteet?
-
-
-

11. 3D-tulostustekniikoiden käyttö tuotannossa – Mitä löytyy? Milloin käytössä ja missä määrin käytössä?
-
-
-

12. Onko jo käytössä olevia älykkäitä tuotanto-/IoT-ratkaisuja – Mitä ja mihin tarkoitukseen?
-
-
-

13. Miten tieto tuotteen tilasta eri tuotantopisteiltä saapuu tuotannonohjausjärjestelmään? Kuinka reaaliaikainen(Riippuuko tekijästä)?
-
-
-

14. Läpimenoaika - Kuinka tarkkaan voidaan määrittää? Mitkä tuotannon osa-alueet vaikeinta määrittää ajallisesti ja siihen liittyviä syitä?
-
-
-

15. Miten yksittäisten tuotannossa olevien valujen paikantaminen/jäljittämien? Sulapanosten paikantaminen ja löytyykö linkki valuihin? Muottien paikantaminen ja löytyykö linkki hiekaeriin/valuihin?

16. Merkintätavat valuissa ja muoteissa – paperinen viivakoodi/data matrix/numero-sarja/muu?

17. Mitä tietoa jää talteen yksittäisen tilauksen/valun osalta tuotantotapahtumista(esim. Käytettyjä materiaaleja, koneiden asetuksia, erikoispiirteitä, simulointituloksia, susimäärä ja niiden syyt?) Mistä löytyy ja kuinka kauan löydettävissä? Löytyykö kaikki samasta paikkaa? PDM/PLM?

18. Koneistuksen ja jälkikäsittelyjen huomiointi ennen ja/tai jälkeen valamisen – Millä keinoin ja vaikutukset koneistusaikoihin/käsittelyaikoihin? Hoidetaanko itse vai jossain muualla?

19. Mitkä ovat yleisimmät valujen hylkäyksiin johtaneet syyt?

20. Valmiin tuotteen toimitus, logistiikka – Miten yleensä? Miten nopeasti kuljetus hoituu valmistumisesta?

21. Valimon omakohtaiset ongelmakohdat/pullonkaulat/kehitysalueet, joihin halutaan parantusta?

22. Millä digitalisaation osa-alueella on eniten potentiaalia valimoissa?

23. Mikä on digitalisaation ensimmäisenä/helpoiten sovellettava osa-alue (ei välttämättä sama kuin ed.)?

24. Jos valimosi olisi "huippudigitaalinen" niin mikä muuttuisi asiakkaissa, tuotannossa, viennissä, arvonmuodostuksessa?
